

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

Josip Nef

DIPLOMSKI RAD

**IZRADA I MANIPULACIJA DIGITALNIH
FIZIKALNO BAZIRANIH MATERIJALA I
NJIHOVA UPORABA U DIGITALNOJ GRAFICI U
STVARNOM VREMENU**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

Smjer: Tehničko - tehnološki, Modul: Multimedij

DIPLOMSKI RAD

**IZRADA I MANIPULACIJA DIGITALNIH
FIZIKALNO BAZIRANIH MATERIJALA I
NJIHOVA UPORABA U DIGITALNOJ GRAFICI U
STVARNOM VREMENU**

Mentor:
doc. dr. sc. Mile Matijević

Student:
Josip Nef
univ. bacc. ing. techn. graph.

Zagreb, 2019. godina

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Zahvale asistentu mentora Marku Maričeviću na pomoći prilikom pisanja ovoga rada, te mentoru Mile Matijeviću na odobrenju pisanja rada ove tematike. Također zahvale svim prijateljima i kolegama na podršci prilikom pisanja ovoga rada, te sugestijama za unaprijeđenje kvalitete rada.

SAŽETAK

Razvoj tehnologije je omogućio veliku slobodu rada u digitalnoj grafici po pitanju izrade 3D modela, tekstura i materijala, te mogućnosti iscrtavanja. Kako pravovremeno iscrtavanja postepeno postaje u sve široj uporabi, van klasične digitalne industrije, tako i potreba za kvalitetnom izradom 3D modela i materijala za tu primjenu konstantno raste. Izrada digitalnih materijala i njihova uporaba u procesu fizikalno baziranog iscrtavanja danas predstavlja osnovne uvjete rada s 3D grafikom. Jasnim razumijevanjem fizikalno baziranog iscrtavanja moguće je uz malo opreme izraditi kvalitetne digitalne reprezentacije fizikalnih materijala, te ih adekvatno koristiti u različitim aplikacijama pravovremenog iscrtavanja.

Ključne riječi: fizikalno bazirano iscrtavanja, pravovremeno iscrtavanja, fizikalno bazirani materijali, teksture, fotogrametrija, proceduralne teksture

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	5
2.1. Sjenčar	5
2.2. Fizikalno bazirano sjenčanje	8
2.2.1. Osnovni modeli	9
2.2.2. Fizikalno bazirana metoda	10
2.2.3. Podjela materijala	14
2.3. Teksture	15
2.3.1. Bazična boja	17
2.3.2. Metalno svojstvo	18
2.3.3. Grubost	19
2.3.4. Normala	20
2.3.5. Visina	22
2.3.6. Tipovi tekstura	24
2.4. UV Mapiranje	27
2.4.1. Proces UV mapiranja	27
2.4.2. Gustoća tekstura	31
3. EKSPERIMENTALNI DIO	34
3.1. Materijal iz pojedinačne fotografije	34
3.2. Materijal iz višekutnih fotografija	40
3.3. Materijal uporabom tehnike fotogrametrije	45
3.4. Materijal izrađen proceduralnim funkcijama	56
4. REZULTATI I RASPRAVA	62
5. ZAKLJUČAK	71
6. LITERATURA	73
7. PRILOZI	77

1. UVOD

Od samih začetaka, ljudska vrsta je fascinirana svijetom oko sebe, te se vrlo brzo pojavljuju umjetnički izražaj temeljen na okruženju i društvu toga doba. Najstariji crteži spiljskog čovjeka mogu se pronaći u špilji Altamira u Španjolskoj, a datiraju već negdje između 15.000 i 12.000 godina prije Nove ere. Proučavajući tematiku tih radova može se zaključiti kako je tadašnjem čovjeku takav stil izričaja bio ceremonijalne prirode, prikazujući životinje i scene lova popraćene različitim grafikama simbola. Sa druge strane također pokazuju upućenost tadašnjeg čovjeka sa sadržajem kojeg reproducira. [1]

Proučavajući tehnike kojima su djela napravljena može se prepoznati iznimno znanje tadašnjih umjetnika. Sami crteži sadrže veći broj boja, do tri po prikazanoj životinji, što je puno više od norme toga vremena. Također su sve prikazane životinje u realnoj veličini sa iznenađujuće preciznim proporcijama. Osim toga se može vidjeti količina detalja i truda koji su posvetili teksturama životinja, poput krzna. [1]

Kroz povijest se umjetnički aspekt ljudske prirode nastavio razvijati kako se razvijala kultura i društvo. Ljudska vrsta je konstantno tražila nove načine kako bi opisala, objasnila i prikazala svijet oko sebe, te prenijela priče i poruke budućim generacijama.

Pojavom tehnike pokretnih slika, odnosno filma krajem 1800-ih godina, prikazivanje svijeta i prenošenje priča poprima novu dimenziju. Umjetnici shvaćaju kako se radi o novom mediju izražavanja koji ne podliježe istim zakonima izražavanja poput kazališne umjetnosti ili klasičnog slikarstva. Postepeno počinju koristiti različite tehnike rada kako bi obogatili svoja djela i prenijeli vizualno interesantnu poruku. Alfred Clark je prvi redatelj koji je upotrijebio specijalne efekte, tada zvane iluzije, u filmu *The Execution of Mary, Queen of Scots* kako bi dočarao naizgled nemoguće događaje, u odnosu na tradicionalnu dramsku umjetnost, u pokretnoj slici. Nakon toga filma, slijedi cijela generacija redatelja koji na neki način upotrebljavaju specijalne efekte kako bi bolje dočarali svoje priče, istovremeno stremeći realnosti prikaza kako bi postigli što veći doživljaj imerzivnosti. [2]

Narednih godina se filmska industrija i umjetnost, te popratne tehnologije snimanja dalje razvijaju kako bi utemeljili dominaciju nad modernim medijima umjetničkog izražavanja. Iz godine u godinu specijalni efekti postaju sve kompliciraniji i u sklopu tehnika snimanja i produkcije, sve vjernije prikazuju dani sadržaj. Redatelji nisu više limitirani realnim svijetom, već mogu proširiti realni svijet imaginarnim kao u filmovima *King Kong*, *War of the Worlds* i *Jason and the Argonauts*. [2]

Ivan Edward Sutherland, otac računalne grafike, početkom 1960-ih godina razvija prvi interaktivni računalni grafički program *Sketchpad* kao dijelom svoje doktorske diser-

tacije. *Sketchpad* tako postaje prvi računalni grafički program s kojim je moguće iscrtavati linije i oblike direktno na zaslonu pomoću posebne olovke. [3, 4] Tim radom je otvorio vrata posve novom načinu interakcije sa računalom, te integraciju digitalnog doba u sfere klasične umjetnosti.



Slika 1. I. E. Sutherland i *Sketchpad* računalni program,
http://resumbrae.com/ub/dms423_f08/06/

Kroz sljedećih relativno kratkih godina se razvijaju različite tehnike kako bi se olakšao i unaprijedio rad sa grafikom na računalima. James Blinn 1976. godine razvija proces *Environmental Reflection Mapping*, a 1978. godine *Bump Mapping*. Sa druge strane Ivan Sutherland i David Evans 1968. godine osnivaju prvu kompaniju za računalnu grafiku, *Evans & Sutherland*. Kasnijih godina George Lucas osniva kompaniju *Industrial Lights and Magic* kako bi radili na specijalnim efektima za film *Star Wars* za kojega su kasnije osvojili nagradu Oscara u kategoriji najbolji vizualni efekti 1978. godine. [2, 5] Od toga trenutka, sve više redatelja i filmova koristi različite vrste specijalnih efekata, od klasičnih eksplozija, do punopravnih digitalnih glumaca, stvorenja i sličnih fantastičnih bića.

Uz razvoj digitalne grafike u filmskoj industriji, potpomognuto razvojem računala, te njihove dostupnosti, također se pojavljuju prve video igre kao novi oblik umjetničkog izražavanja, te prvog interaktivnog medija za prenošenje informacija i priča. Od prvih jednostavnih igara razvijanih poput arkada za vrijeme 1970-ih godina, pa sve do prvih 3D igara ranih 2000-ih godina, industrija video igara se razvija u rekordnom roku. [6, 7]

Razvoj digitalne umjetnosti se također proširio na sve klasične oblike umjetnosti u nekom obliku, te su se razvile potpuno nove grane umjetnosti i izražavanja. Iako je napredak različitih digitalnih alata i trendova neminovan, ostaje sigurno kako se ljudska vrsta ima potrebu izražavati na različite načine kako bi prenijeli poruku, misao ili osjećaje.



Slika 2. Scena iz filma Star Wars: IV - A New Hope,
<https://www.imdb.com/title/tt0076759/mediaviewer/rm1176932096>

U današnje vrijeme, zahvaljujući razvoju digitalnih programa, te dostupnosti računala, sve više ljudi se može baviti digitalnom grafikom na vrlo visokoj razini kvalitete. Određeni aspekti koji su unatrag par godina bili dostupni velikim studijima, sada su dostupni svakodnevnom čovjeku. Počevši sa računalnim programima za obradu računalne geometrije u trodimenzionalnom prostoru do izrade kompleksnih materijala koji dodatno opisuju nastalu geometriju.

U počecima razvoja digitalne grafike veliki studiji poput Pixar-a su ulagali iznimno puno resursa u istraživanje i izradu različitih metoda iscrtavanja digitalnih trodimenzionalnih scena što je uključivalo interpretaciju svjetlosti, materijala, geometrije i digitalne kamere. Jedan od aspekata takvoga rada koji je potom imao snažan utjecaj na digitalne umjetnike je jednostavniji princip izrade digitalnih, fotorealističnih materijala i tekstura. Inače vrlo mukotrpan i komplicirani proces koji je zahtijevao puno znanja i računalne snage, danas se može ostvariti uz pomoću računalnih programa, mobilne kamere i jednostavnog seta pravila. [8]

Ovaj rad će obuhvaćati teoriju i praksu vezanu uz izradu foto realnih, fizikalno baziranih materijala putem dostupnih računalnih programa i jednostavne opreme poput mobilne kamere. U današnje vrijeme, posebice u pravovremenom iscrtavanju, teksture i materijali postaju u sve češćim slučajevima veći prioritet unutar produkcije od samih 3D modela.

Cilj ovoga rada je u tome slučaju pokazati i objasniti procese stvaranja takvih materijala, te demistifikacija određenih pojmova digitalnim umjetnicima. Na taj način će se

moći pokazati kako se vrlo jednostavno mogu ostvariti rezultati iznimno visoke kvalitete bez potrebe vanjskih suradnika ili specijalizirane opreme. Sa druge strane i dalje baveći se umjetničkim aspektom svojih radova.

U nastavku rada će se prikazati osnovne svih segmenata koji su potrebni za razumijevanje procesa izrade samih tekstura i materijala. Također će se na taj način moći predložiti kompleksnost cijelog sustava, ali koji se u konačnici može pojednostaviti kako bi se različiti tipovi digitalnih umjetnika mogli jednostavnije koristiti istim alatima.

2. TEORIJSKI DIO

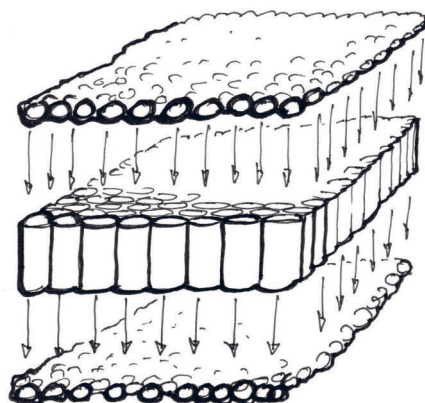
U ovome dijelu rada će biti predstavljeni pojmovi i teorijske postavke koje su ključne za pravilno razumijevanje izrade i uporabe fizikalno baziranih materijala. Kako je riječ o velikom broju procesa i segmenta koji ulaze u konačno iscertavanje samih materijala, neće se svi segmenti obrazložiti u detalje. Fokus će se zadržati na detaljnom objašnjenju dijelova koji direktno utječu na proces izrade i manipulacije, dok će se pozadinski proces i segmenti spomenuti kako bi se djelomično moglo razumjeti što se u računalnoj pozadini događa prilikom rada jer za određene segmente je potrebno profesionalno poznavanje računalnih sustava i programskih jezika.

Takav pristup će omogućiti jasnije razumijevanje eksperimentalnog djela rada gdje će se često koristiti pojmovima prikazani u ovome djelu. Određeni pojmovi će se koristiti kao izvorno engleski izrazi. Razlog tome je što su određeni izrazi standardni nazivi u 3D digitalnoj industriji širom svijeta, te pokušaji prijevoda mogu uvesti nepotrebnu konfuziju prilikom uporabe istih pojmova.

2.1. Sjenčar

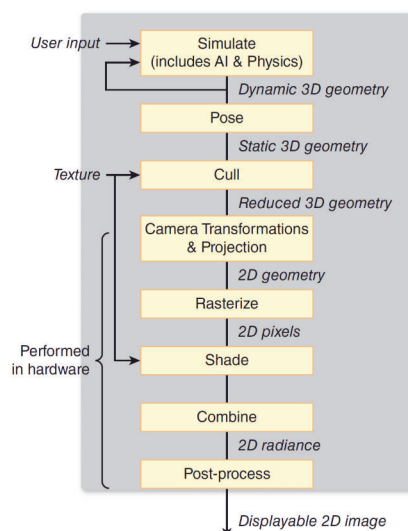
Kako bi se digitalne scene mogle stvoriti potrebno je napraviti niz različitih matematičkih operacija na računalu. U digitalnoj grafici taj proces se naziva *graphics pipeline*, te se dijeli na dvije skupine u obliku *rasterization pipeline* i *ray tracing pipeline*. [9]

Jedan od glavnih elemenata procesa iscertavanja bilo kojega tipa je pravilo prosljeđivanje informacija između CPU-a (*eng. central processing unit*), GPU-a (*eng. graphics processing unit*), računalne aplikacije, te interpretacije različitih informacija. Kako bi taj proces bio što efikasniji razvijaju se specifični dijelovi koda, koji podsjećaju na punopravne programe, pod nazivom *shaders*. *Shader*-i su pisani u specifičnim programskim jezicima, poput *High-Level Shading Language*, kako bi rad sa njima bio što jednostavniji. [10] U počecima razvoja su se pisali specifični računalni kodovi ovisni o kombinaciji računalnih aplikacija i uređaja, dok su se naknadnim razvojem počeli pisati kao generalni kodovi, koji više slične operativnom sistemu. [9] Također, u počecima su se same operacije izvodile na CPU-u, a kako je riječ o iscertavanju piksela, najčešće velikog broja piksela, postepeno su se sve operacije počele izvoditi na GPU-u. Na taj način se mogla obraditi velika količina podataka istovremeno, što dovodi do značajnog napretka u mogućnostima samog iscertavanja. [11]

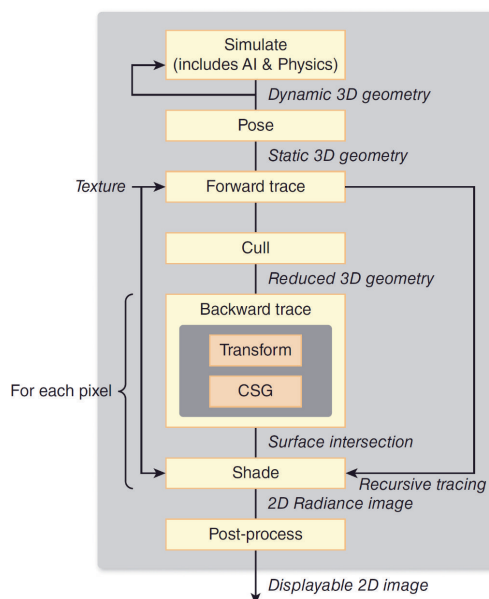


Slika 3. Ilustracija obrade podataka pomoću GPU-a,
<https://thebookofshaders.com/01/>

Shader-i utječu na veliki broj operacija koje čine iscrtavanje objekata mogućim. Oni predstavljaju set instrukcija po kojima se određeni ulazni parametri obrađuju, te kojim redoslijedom. Kao primjer, *shader*-i su zaslužni za transformaciju objekata iz objektnog prostora u prostor svijeta, te potom u prostor kamere (različiti tipovi trodimenzionalnih koordinatnih sustava koji se koriste u digitalnoj grafici). Također su zaslužni za dodjeljivanje boje samim pikselima, što u konačnici reprezentira vrlo veliki broj perceptivnih svojstava materijala, okruženja i dinamike. [9] Osim toga, mogu utjecati na veliki broj drugih svojstava. Ovisno o procesu rada poznavanje *shader*-a može omogućiti kreaciju različitog broja specijalnih vizualnih efekata, optimizaciju scena i utjecati na sami način rada digitalnih umjetnika.



Slika 4. Schema rasterization pipeline-a,
Computer Graphics: Principles and practice, 3rd edn., str. 928



Slika 5. Schema ray-tracing pipeline-a,
Computer Graphics: Principles and practice, 3rd edn., str. 929

S obzirom na jako brzi razvoj digitalne umjetnosti i tehnologija, *shader*-i se također brzo razvijaju, te dolazi do podjele u nekoliko osnovnih varijanti, gdje je svaka skupina zaslužna za određeni broj i tip operacija koje se obrađuju prilikom iscrtavanja grafike. [9]

Osnovni tip *shader*-a se naziva *vertex shader* koji se obrađuju za svaku trodimenzionalnu točku (eng. *vertex*) u zadanom grafičkom procesu. Njihova zadaća je transformirati koordinate unutar 3D virtualnog prostora u 2D koordinate koje će biti prikazane na digitalnom zaslonu. U ovom stadiju se mogu manipulirati isključivo koordinate različitih elemenata, ali se same trodimenzionalne točke ne mogu manipulirati. Ovim putem se može postići visoki stupanj kontrole nad svim komponentama jedne 3D scene. Nakon *vertex shader*-a najčešće dolazi *geometry shader* koji može kao ulazne parametre koristiti površine opisane sa najmanje 3 točke. Tada može rastaviti zadanu scenu na fragmente koji se kasnije prenose u *pixel shader*. Jedan od novijih *shader*-a je *tessellation shader* koji je potaknuo promjenu u povećanju kvaliteti iscrtanih vizualizacija. Sami proces se sastoji od dva dijela, a u konačnici rezultiraju povećavanjem ili smanjivanjem rezolucije 3D modela u odnosu na udaljenost od kamere. U kombinaciji sa drugim tehnikama se na taj način može ostvariti prikaz površina na makro razini bez gubitaka detalja. [9, 12]

Posljednji u nizu je *pixel shader* ili *fragment shader*. U svojem najjednostavnijem obliku, on je zaslužan za boju koju poprima svaki piksel na digitalnom zaslonu. S obzirom na kompleksnost samog grafičkog procesa iscrtavanja, ovaj segment može imati

veliki broj ulaznih parametara, te u konačnici može utjecati na iscrtavanje velikog broja elemenata jedne 3D vizualizacije poput materijala, sjena, refleksija, te mnogih drugih efekata. U ovom stadiju se također apliciraju različiti efekti poput mutnoće, dubinske oštine i sličnih. [12, 13]

Kako je riječ o kompleksnom sustavu koji se nalazi u sferi programiranja, matematike i informatike, većina digitalnih umjetnika se ne koristi *shader*-ima direktno unutar koda, već ih primjenjuje kroz različite digitalne alate kako bi postigli željeni efekt. Većina digitalnih alata, te tehnika iscrtavanja, se zasniva na kalkulacijama ulaznih parametara koji mogu biti 3D geometrije, različite slike u obliku tekstura i materijala, te svijetla i drugih elemenata. Digitalni umjetnik u tim slučajevima manipulira ulaznim parametrima kako bi postigao željeni izgled ili efekt scene, najčešće kroz intuitivne parametre kako bi se mogao fokusirati na ostvarivanje cilja. Na drugu stranu, od digitalnih umjetnika se očekuje određeno poznavanje *shader*-a i procesa iscrtavanja kako bi mogli kvalitetno i optimizirano manipulirati ulaznim parametrima. [13]

Razvojem različitih digitalnih aplikacija dolazi do pojednostavljenja procesa manipulacije i korigiranja određenih aspekata *shader*-a što omogućava veću umjetničku slobodu. [13] Također postoji veliki broj tehničkih umjetnika koji čine most između programera i digitalnih umjetnika, te se oni često bave pisanjem specifičnih *shader*-a za određeni proces rada ili određenu problematiku.

Osnovno poznavanje *shader*-a će omogućiti bolje razumijevanje praktičnog dijela rada, te će pomoći u objašnjenju sljedećih teorijskih tema.

2.2. Fizikalno bazirano sjenčanje

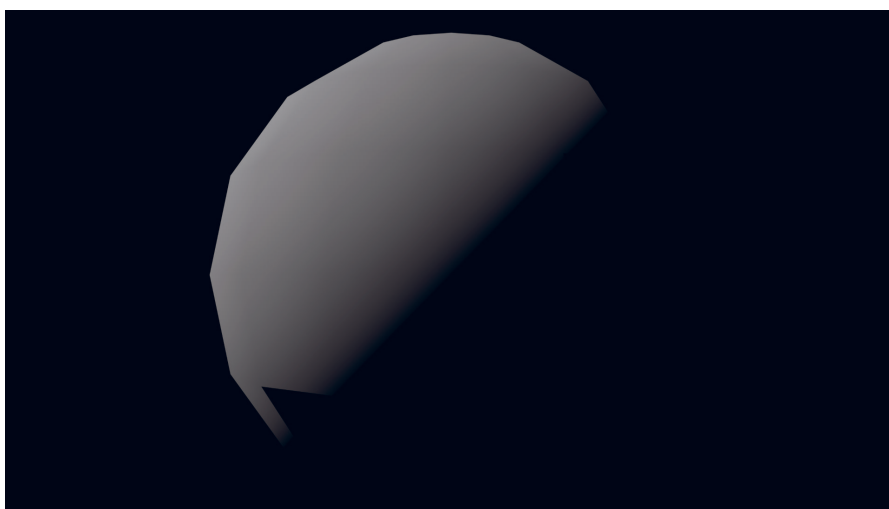
Fizikalno bazirano sjenčanje (*eng. physically based rendering, PBR*) je trenutačni tip rada koji se koristi širom industrije specijalnih efekta, video igrice i vizualizacija. U samoj suštini, fizikalno bazirano sjenčanje je skup različitih načina interpretacije digitalnih 3D scena, te interakcije elemenata zadane scene. Sami cilj je postići fizikalno ispravne vrijednosti tijekom cijelog procesa grafičkog iscrtavanja. [14]

Kako bi se bolje razumio sami proces fizikalno baziranog sjenčanja potrebno je razumjeti osnovne modele sjenčanja. Poznavajući osnove fizikalno baziranog sjenčanja, digitalni umjetnik je u mogućnosti samostalno stvarati materijale i procese rada koji će zadovoljiti parametre fizikalno baziranog sjenčanja. O određenim dijelovima procesa stvaranja fizikalno baziranih materijala će biti riječ u naknadnim poglavljima.

2.2.1. Osnovni modeli

Iscrtavanje objekata u digitalnoj grafici se može relativno jednostavno pojednostaviti. Proučavajući realne primjere objekata i materijala koji se nalaze u svakodnevicu, može se primijetiti kako svi objekti posjeduju određena svojstva. Svojstva poput boje, grubosti, refleksije, te mnogih drugih. Tijekom 1970-ih godina se razvijaju prvi modeli sjenčanja koji u obzir počinju uzimati različite kalkulacije temeljene na opservacijama ponašanja objekata u pravom svijetu. [15]

Jedna od osnovnih metoda sjenčanja je Lambert model sjenčanja (*eng. Lambert shading*) kojim se definiraju difuzne površine i objekti. Kod takvih objekata se smatra kako nemaju izraženu refleksiju neovisno o kutu promatranja samog objekta. Česti primjeri su list papira ili unutarnji zidovi kuće koji osim u iznimnim slučajevima nemaju oštre i intenzivne refleksije poput „metalik” automobilske boje. Takvi objekti se tada ponašaju prema Lambertijanskom modelu. Jedan od glavnih nedostataka ovog tipa sjenčanja objekata je što će u situacijama nedostatka direktnog svjetla objekti biti potpuno crni. U realnom svijetu, ne postoji apsolutno crna površina, te objekti koji se nalaze u sjeni nikada nisu potpuno crni već imaju određenu boju i stupanj iluminacije zbog same prirode svjetlosti. [16]



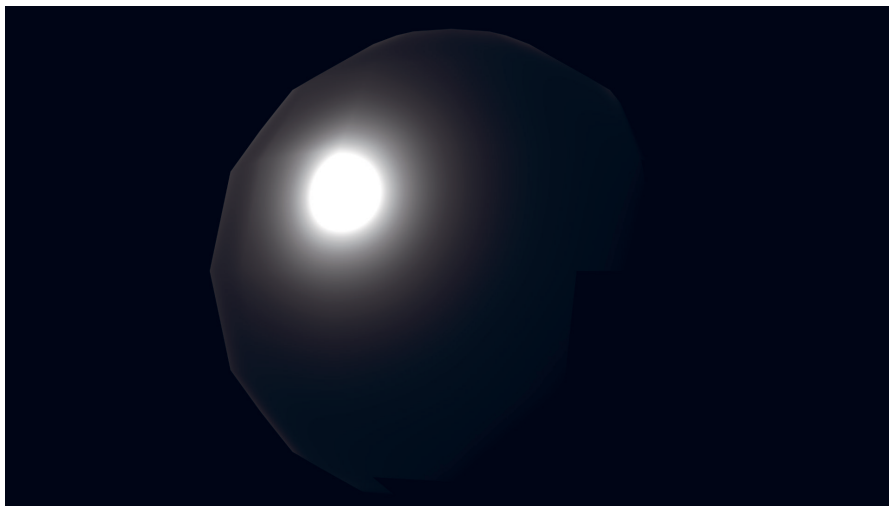
*Slika 6. Primjer Lambert modela sjenčanja,
autorov rad*

U realnom svijetu se mogu pronaći različiti tipovi površina i materijala, te nisu svi isključivo difuzne prirode pa se ne mogu aproksimirati Lambertovim modelom. Određeni objekti imaju vrlo visoki stupanj refleksije poput ulaštenog metala ili drva, dok drugi imaju manje intenzivan, ali ga i dalje posjeduju. Bui Tuong Phong 1975. go-

dine predlaže novi model sjenčanja koji u obzir uzima refleksiju svjetlosti koja se reproducira sa površine objekta. [16]

Prema Phong metodi sjenčanja promatrajući određenu površinu koja ima određeni stupanj refleksije, ona djelomično apsorbira svjetlost, djelomično je reflektira unutar sebe, a ostatak se reflektira sa površine. Ukoliko bi refleksija bila potpuna sa površine onda bi nastalo savršeno ili idealno zrcalo. U slučaju pojave refleksije se uzimaju u obzir dva vektora, jedan koji predstavlja promatrača, a drugi koji predstavlja reflektiranu zraku svjetlosti. Kombinacijama kutova između ta dva vektora se može aproksimirati intenzitet refleksija sa određene točke površine koja se promatra. Ukoliko su kutovi između vektora promatrača i reflektirane zrake bliži nuli, onda će na tome mjestu refleksija biti visokog intenziteta. Što je taj kut manji, to će intenzitet refleksije biti manji. [15, 16]

Iako je ovakav model računanja i aproksimacije refleksija davao adekvatne rezultate on je dalje razrađen Blinn-Phong modelom sjenčanja. Prema tome modelu se uzimaju novi vektori, gdje je jedan okomica na kut između vektora promatrača i zrake svjetlosti, dok je drugi normala površine na koju pada svjetlost. [16]



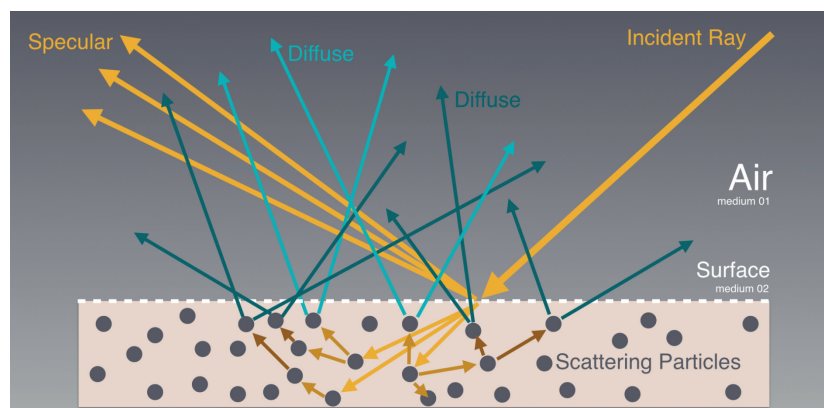
*Slika 6. Primjer Blinn-Phong modela sjenčanja,
autorov rad*

2.2.2. Fizikalno bazirana metoda

Razvojem digitalne grafike, te sve većim zahtjevima za foto realnim prikazima, metode sjenčanja se nastavljaju razvijati na već postojećim osnovnim metodama. Određeni alati za iscrtavanje slike na digitalnom zaslonu korigiraju modele prema njihovoj potrebi, te se na taj način razvijaju slične modele za iscrtavanje. Kako bi se standardizirali modeli

iscrtavanja, te parametri potrebni za unos podataka postepeno se razvija fizikalno bazirano sjenčanje. Trenutačni model fizikalno baziranog sjenčanja se usko zasniva na istraživanju Walt Disney Animation studija. [17]

Fizikalno bazirano sjenčanje definira svjetlost kroz tri različita stanja prilikom interakcija sa materijalom. Zraka svjetlosti se primarno apsorbira na površini materijala, dok se ostatak djelomično reflektira. Stupanj refleksije ovisi o svojstvima samog materijala. Manji dio svjetlosti prolazi kroz materijal, te se nastavlja reflektirati unutar materijala. Ukoliko je riječ o transparentom materijalu dio svjetlosti će u konačnici proći kroz materijal i nastaviti putovati vanjskim medijem. [18]



Slika 7. Ilustracija interakcije zrake svjetlosti s materijalom,
<https://academy.substance3d.com/courses/the-pbr-guide-part-1>

Prilikom prolaska svjetlosti kroz neki heterogeni materijal dolazi do apsorpcije i raspršenja svjetlosnih zraka. Kada je svjetlost apsorbirana intenzitet svjetlosti se smanjuje kako se svjetlosna energija pretvara u toplinsku energiju, pritom mijenjajući boju. Smjer same zrake svjetlosti ostaje nepromijenjen. Sa druge strane, kada dođe do raspršenja svjetlosnih zraka, drastično se mijenja smjer samih zraka svjetlosti, dok energija relativno sporo opada s obzirom na broj refleksija pojedine zrake svjetlosti. Samim time i debljina materijala kroz koji svjetlost prolazi ima veliku ulogu u njezinoj apsorpciji i raspršenju. [18]. Dobar primjer za ovakvo ponašanje svjetlosti su tanki dijelovi ljudske kože, gdje se jasno može vidjeti pod jakim svjetlom kako određeni dijelovi imaju drugačiju boju i transcendenciju.

Reflektirani dio svjetlosti se smatra spekularnom refleksijom (*eng. specular reflection*) s površine određenog materijala. S obzirom na spomenute metode računanja refleksije, ovdje se koristi napredniji set algoritama za računanje koji u obzir uzima samu grubost površine, jer ona direktno utječe na intenzitet i oblik refleksije. Grube površine imaju veću i raspršenu refleksiju zbog svih mikro neravnina po svojoj površini. Na drugu

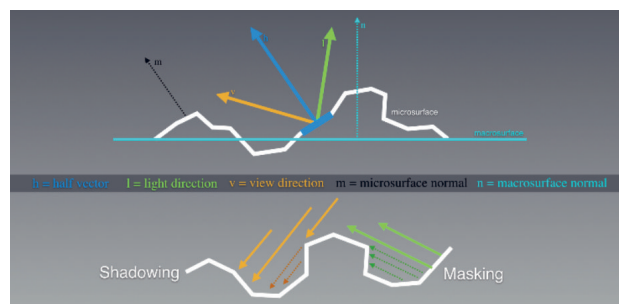
stranu, manje grube površine će imati oštrije i istančanije refleksije. Glavna značajka ovog modela je da će se i u jednoj i u drugoj soluciji zadržati ista količina energije, odnosno količina reflektiranog svjetla je u oba slučaja jednaka. [18]

Difuzna refleksija je u konačnici ona koja daje boju određenom objektu, te ovisi o valnim duljinama svjetlosti koje objekt apsorbira, a koje reflektira. [18]

Potrebno je prikazati refrakciju kao poseban primjer u kojemu se koristi stupanj refrakcije materijala (*eng. index of refraction, IOR*) koji označava koliko se zraka svjetlosti lomi prolaskom kroz određeni transparentni medij. Zbog refrakcije dolazi do raznih efekata poput objekata koji su djelomično uronjeni u vodu, a djelomično na zraku, te pod određenim kutovima izgledaju kao da su slomljeni. [18]

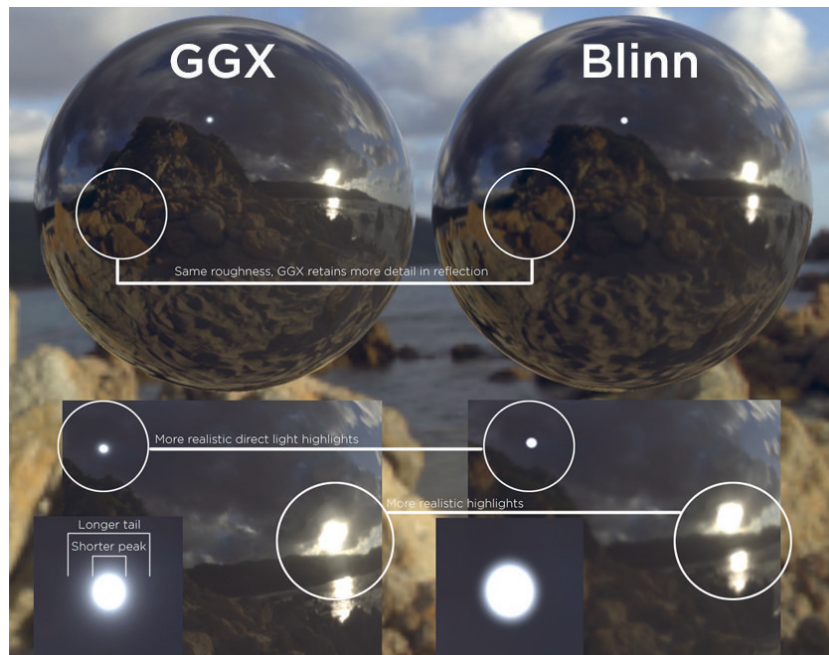
Zakon očuvanja energije je fizikalni zakon prema kojemu se u zatvorenom fizikalnom sustavu zbroj svih oblika energije održava konstantnim. [19] Za interakciju svjetlosti i materijala bi to značilo da je nemoguće u fizikalnom sustavu nakon same interakcije da nastane veći intenzitet svjetlosti nego na početku interakcije. [18]. Kako je ovaj model utemeljen na fizikalnim zakonima, tako i taj zakon mora biti očuvan prilikom preračunavanja karakteristika materijala i svjetlosti. U zakon očuvanja energije, u ovom kontekstu, ulazi veći broj zasebnih komponenti koje zajedno čine održivi sustav.

Jedna od glavnih značajki fizikalno baziranog sustava se zasniva na teoriji mikro detalja (*eng. micro facets*) koji se nalaze na površini svih materijala. Kada bi se vrh noža gledao pod mikroskopom moglo bi se vidjeti kako je njegova struktura zapravo neravna, dok na pogled djeluje savršeno ravno i oštro. Teorija mikro detalja objašnjava, ako se može dogoditi refleksija na površini između vektora svjetla i vektora pogleda (Lambert model sjenčanja), tada mora postojati dio površine, mikro površina, kojoj je normala orijentirana na centru prva dva vektora. [17]. To u konačnici utječe na drugačiju raspodjelu reflektiranih zraka svjetlosti. Ovo ponajviše utječe na oblik i percipirani intenzitet refleksije sa određenog materijala. [18].



Slika 7. Ilustracija mikro nepravilnosti površine,
<https://academy.substance3d.com/courses/the-pbr-guide-part-1>

Sama refleksija se ponaša prema zakonu funkcije dvosmjerne distribucije refleksije (eng. *bidirectional reflectance distribution function, BRDF*) koja se mora pridržavati zakona reciprociteta koji se zasniva na Helmholtz principu reciprociteta. Helmholtz princip reciprociteta kaže da se upadajuće i izlazne zrake svjetlosti mogu smatrati inverzijama jedne druge bez utjecanja na BRDF. [17, 18]



Slika 8. Usporedba dva tipa distribucije refleksija,
<https://academy.substance3d.com/courses/the-pbr-guide-part-1>

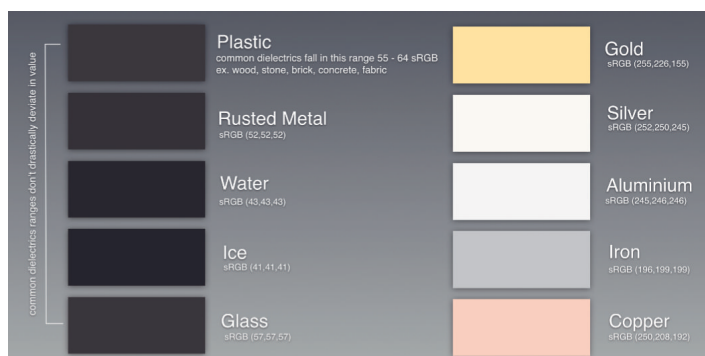
Još jedan bitan segment očuvanja energije u ovome kontekstu koji direktno utječe na BRDF je Fresnelov efekt (eng. *Fresnel effect*). Fresnelov efekt je dobio ime po francuskom fizičaru Augustinu-Jean Fresnelu koji je definirao da količina reflektirane svjetlosti sa neke površine ovisi o kutu gledanja te iste površine. Fresnelov efekt se potom dijeli na rubne kutove kada je normala površine okomita na vektor kamere ili oko promatrača, te na kut od 0 stupnjeva gdje su vektori paralelni. [18]

Trenutačno se koriste dva tipa rada kada se govori o fizikalno baziranom sjenčanju. *Metal-rough pipeline* je dominantan način rada u industriji, dok se *spec-gloss pipeline* koristi u manjoj mjeri. Oba tipa rada rezultiraju vrlo sličnim rezultatima, te korištenje jednog ili drugog zapravo ovisi o programu za iscertavanje samih 3D scena. U nastavku rada i u eksperimentalnom dijelu rada će se govoriti i koristiti *metal-rough pipeline* način rada s obzirom na njegovu popularnost u samoj industriji. [20]

2.2.3. Podjela materijala

Glavna podjela u fizikalno baziranom sjenčanju i iscrtavanju je podjela materijala na metale i nemetale. Iako postoje materijali koji ne spadaju u navedene kategorije, njih je dovoljno malo u odnosu na navedene, da se za njih rade iznimke prilikom iscrtavanja i sjenčanja. [18]

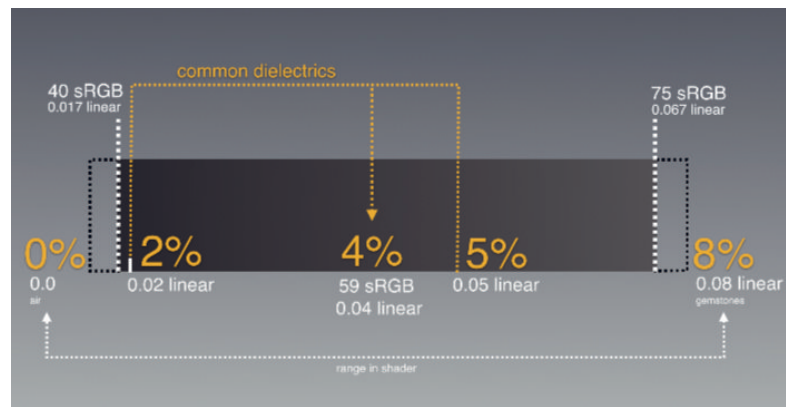
Metali se također smatraju vodičima zbog sposobnosti da dobro provode električnu energiju i toplinu. Njihova glavna značajka je da djelomično reflektiraju svjetlost, dok svu slomljenu svjetlost apsorbiraju. Na taj način je njihova vrijednost za 0 stupnjeva Fresnelovog efekta oko 70% do 100% refleksije. Samim time, boja metala je definirana refleksijom svjetlosti. Unutar samoga rada sa fizikalno baziranom metodom, metali nemaju difuznu komponentu, već imaju boju zadanu unutar refleksije. [18]



Slika 9. F0 vrijednosti određenih metala i nemetala,
<https://academy.substance3d.com/courses/the-pbr-guide-part-1>

Kako materijali mogu korodirati sa vremenom ili se bojati i tretirati različitim načinima, tako treba razlikovati njihova svojstva. Kada je metal pod nekim od tih uvjeta, zapravo se reprezentira kao izolator ili nemetal. [18]

Dakle, na drugu stranu se opisuju nemetali ili izolatori. Oni slomljenu svjetlost djelomično apsorbiraju, a djelomično je reflektiraju. U konačnici oni reflektiraju puno manje svjetlosti od samih metala tako da su njihove vrijednosti za 0 stupnjeva Fresnelovog efekta između 2% i 5% refleksije. Sa druge strane, njima se definira difuzna komponenta. Nemetali pokazuju drugačija svojstva refleksije pod 90 stupnjeva Fresnelovog kuta. U tome trenutku se ponašaju gotovo kao metali, te je tada njihov stupanj refleksije gotovo jednak 100% refleksije. [18]



Slika 9. Konverzija iz sRGB prostora u linearni koriteći gama vrijednost 2.2,
<https://academy.substance3d.com/courses/the-pbr-guide-part-1>

Kao i kod većine računalnih simulacija pravog svijeta i ovdje je riječ o aproksimaciji. Sve zadane vrijednosti su pokazne prirode, te ih se nije potrebno strogo pridržavati ukoliko se iznimno želi postići neki drugačiji efekt.

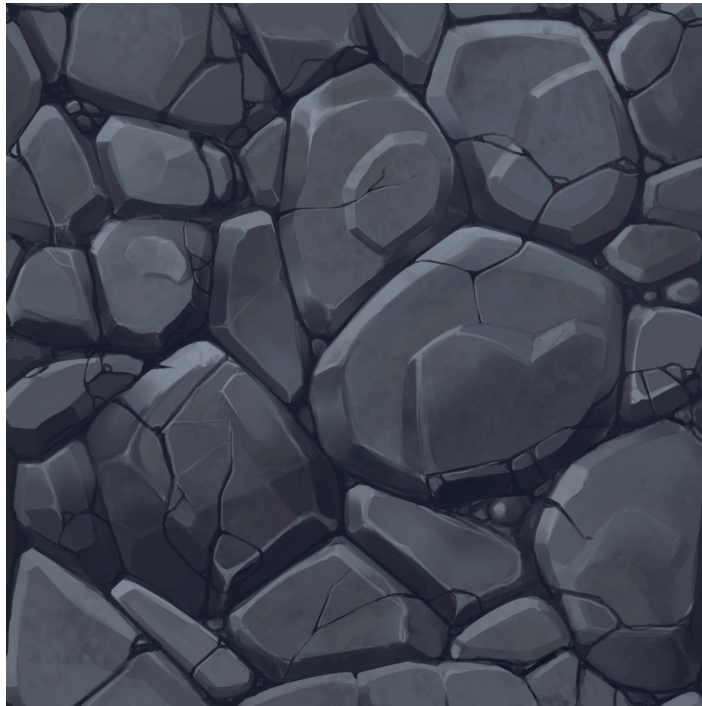
2.3. Teksture

Kako je u prijašnjim poglavljima opisano, iscrtavanja digitalne grafike zahtjeva veći broj komponenti. Do sada su opisani pozadinski procesi koji se događaju i koji definiraju krajnji ishod iscrtavanja određene scene sa svim svojim komponentama. U nastavku će biti opisane informacije koje digitalni umjetnik koristi kao ulazne parametre prilikom definiranja materijala. Moći će se primijetiti kako su određeni procesi rada dosta slični svojim analognim predstavnicima u klasičnoj umjetnosti poput slikarstva i kiparstva.

U klasičnim umjetničkim tehnikama postoje dva tipa tekstura koje se koriste, taktilne i vizualne teksture. Taktilne teksture kako im ime govori se odnose na fizikalnu komponentu samog umjetničkog djela. Ukoliko je riječ o kiparstvu, tu se može smatrati odabir određenog materijala poput kamena ili mramora, te će svaki svojim karakteristikama drugačije opisivati umjetninu. U slikarstvu se također može govoriti o taktilnim teksturama, uporabom manjih ili većih nanosa boje koje potom zauzimaju određeni stvarni prostor, te time pridonose dubini slike. Smatra se da su određeni slikari dodavali materijale poput pijeska svojim bojama kako bi dodatno obogatili svoje slike. [13]

Sa druge strane vizualne teksture su one koje predočavaju kakva bi površina mogla biti kada bi osoba mogla doći u fizički kontakt sa njome. Ovdje je riječ o tehnikama sjenčanja koje se mogu proučavati kroz cijelu povijest slikarstva, gdje su umjetnici željeli postići osjećaj dubine tamnijim tonovima u sjeni, odnosno svjetlijim tonovima na objek-

tima s kojih se reflektira svjetlost. Takvim tehnikama su postizali osjećaj dubine u dvodimenzionalnom mediju. [13]



*Slika 10. Primjer „ručno bojane” teksture,
<https://kairosmith.com/projects/AdZ4e>*

U počecima digitalne umjetnosti su se vizualne teksture radile doslovno kao u klasičnom slikarstvu, gdje su se ručno slikale sjene i refleksije. Razvojem različitih metoda iscrtavanja i sjenčanja su se mnogi takvi elementi prepustili internim računalnim kalkulacijama. S obzirom na sličnosti između rada takve digitalne reprezentacije su nazvane teksture (*eng. textures*). U modernom dobu računalne grafike, teksture u većini slučajeva nemaju isto značenje kao nekada. Potrebno je napomenuti da postoji stil u digitalnoj umjetnosti gdje se teksture „ručno slikaju”, gdje se namjerno koristi klasična metoda teksturiranja kako bi se dobio poseban, stilizirani izgled kao rezultat iscrtavanja. [9]

Unatoč tome, termin teksturiranja se zadržao kao proces izrade tekstura ili ulaznih parametara za fizikalno bazirano iscrtavanje. Proces apliciranja tekstura je usko povezan sa procesom sjenčanja pomoću *shader*-a. Najčešće se u *pixel shader*-u obrađuju teksture, materijali i odnos sa okolinom. Teksture u tome obliku reprezentiraju slikovni zapisi jednodimenzionalnih, dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih matrica. [21]

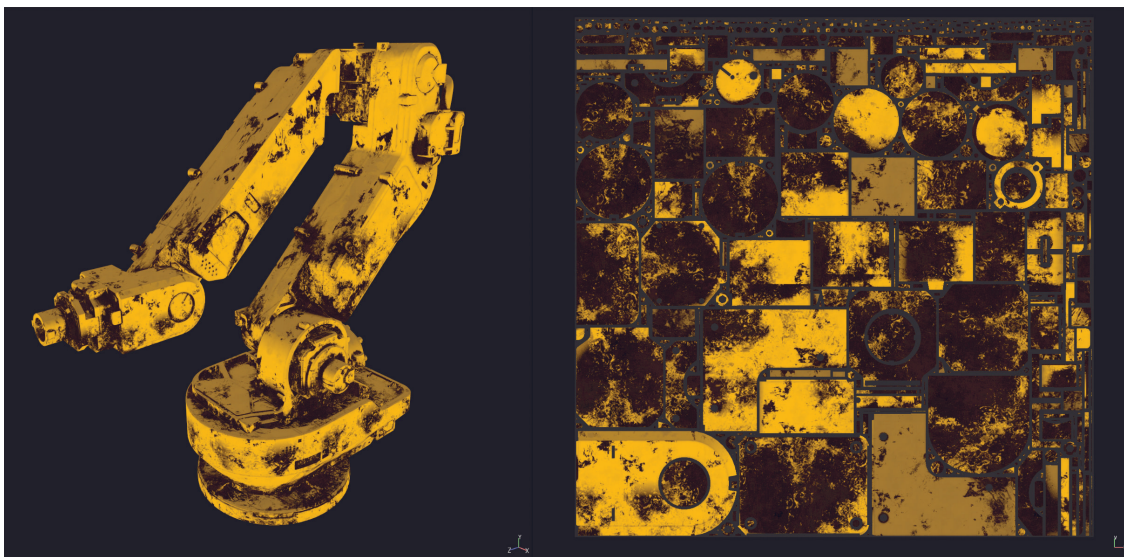
U nastavku će biti opisani osnovni tipovi tekstura koje se najčešće koriste prilikom izrade fizikalno baziranih materijala i sukladnog tipa iscrtavanja. Te teksture će biti prikazane kroz praktični primjer u eksperimentalnom dijelu rada.

2.3.1. Bazična boja

Jedna od osnovnih tekstura koja se koristi prilikom definiranja materijala određenog objekta je albedo tekstura ili tekstura bazične boje (*eng. base color*). Ona se definira kroz RGB (*eng. red, green and blue*) slikovni zapis, te definira boju samog materijala. Pod bojom se smatra boja difuzne svjetlosti što materijal reflektira istovremeno isključujući bilo kakvu komponentu direktnog i indirektnog svjetla, te kontaktnih sjena. Na taj način se zadržava prava vrijednost boje, odnosno valne duljine reflektirane svjetlosti, određenog materijala. [22]

Prilikom uporabe albedo teksture, gore navedena definicija se odražava na dielektrici-ma, odnosno ne metalnim područjima. U slučaju da je određeni dio materijala metalan, tada albedo tekstura odražava spekularnu boju metala. [23]

Kada je riječ o samom zapisu albedo teksture, onda ona ovisi o kojem krajnjem proizvodu je riječ. Ukoliko je riječ o pravovremenoj grafici poput video igara, tada se najčešće zapisuje kao 8-bitni zapis RGB kanala, dok se u filmskoj industriji najčešće preferira 16-bitni zapis RGB kanala, pa i 32-bitni. [24] Razlog takvog tipa zapisa je ukupni mogući broj boja koji se može prikazati prilikom iscrtavanja, gdje što je veći broj mogućih indeksa za boju (bitova), se može prikazati veći gamut boje, odnosno prostor boje. [25]

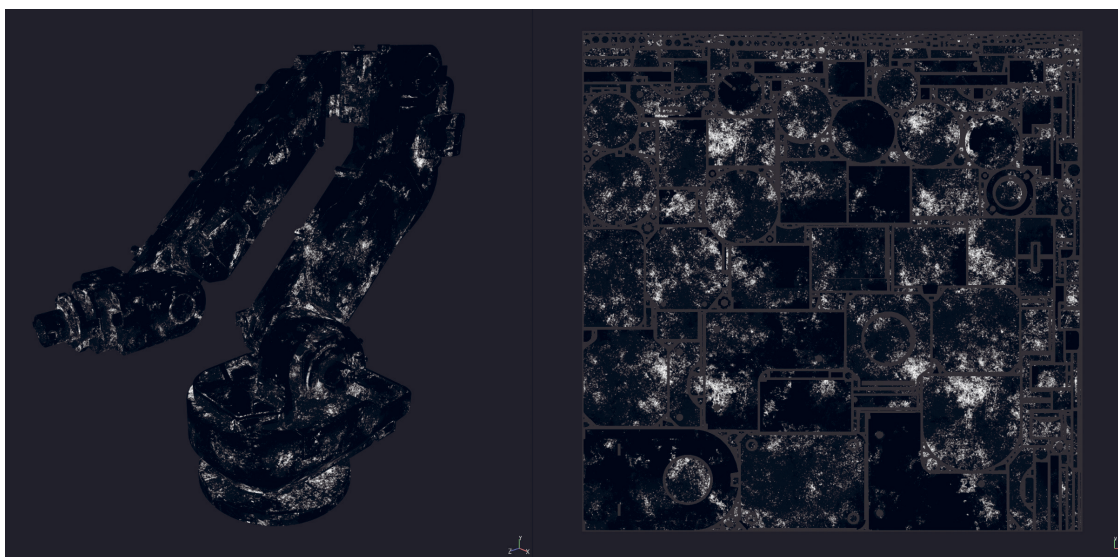


*Slika 11. Primjer albedo teksture,
autorov rad*

Također može doći do razlike gama vrijednosti u kojoj se sama tekstura zapisuje. Kada je riječ o pravovremeno crtanoj grafici, najčešće je riječ o gama vrijednosti izlaznih uređaja, odnosno monitora, što bi odgovaralo vrijednosti 2.2. Prilikom rada u filmskoj produkciji se najčešće sve vrijednosti lineariziraju, odnosno radi se o gama neutralnom području koje iznosi 1.0. Na taj način se omogućuje efikasniji tijekom post-produkcije.

2.3.2. Metalno svojstvo

Metalna tekstura (*eng. metalness, metallic*) je kako joj ime govori tekstura koja odražava metalno svojstvo određenog materijala. Zapravo je riječ o crno-bijelom zapisu koji određuje koji su dijelovi objekta metalni, a koji su dielektrici. Na taj način se na jasan i intuitivan način mogu odrediti pozadinska svojstva materijala prilikom iscrtavanja. Bijela područja texture označavaju metalne dijelove materijala koji upućuju program iscrtavanja da je riječ o metalu, te se tada ta područja u svojem albedo dijelu tretiraju kao potpuno crna, vrijednosti 0, ali se iz albedo mape tada gleda njihova spekularna boja i intenzitet. Na drugu stranu, crna područja označavaju nemetalne materijale, te se njima dodjeljuje fiksna vrijednost refleksije. [20, 22]



*Slika 12. Primjer metalness texture,
autorov rad*

Na takav način se na jednostavan i razumljiv način može napraviti jednostavna podjela prilikom izrade materijala. Također je prednost što je krajnji produkt crno-bijela tekstura koja zauzima manje radne memorije i procesorske snage nego potpuna RGB

tekstura. Također je preporuka da se koriste vrijednosti ili 0 ili 1 prilikom korištenja ove teksture, jer samo iznimni slučajevi materijala iziskuju svojstva koja su van okvira metala ili dielektrika. [22]

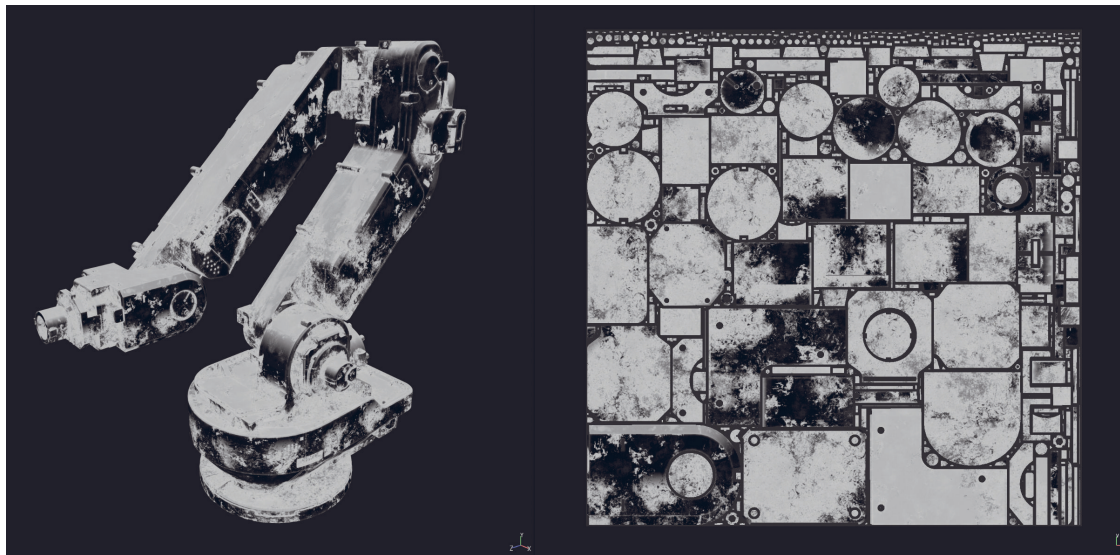
Što se tiče samog zapisa, riječ je o crno-bijelom slikovnom zapisu koji se može zapisivati kao 8-bitni ili 16-bitni zapis ovisno o kontekstu u kojemu se koristi. Kada je riječ o materijalima koji imaju vrlo eksplicitno definirane dijelove koji su metalni, a koji su nemetalni, moga bi se koristiti i 1-bitni zapis time dodatno smanjujući veličinu samog zapisa.

2.3.3. Grubost

Treća tekstura koja se smatra osnovnom kada se opisuje određeni materijal je *roughness* tekstura. Ovdje je također riječ o crno-bijeloj teksturi sa vrijednostima od 0 do 1. Ova tekstura zapravo reprezentira mikro nepravilnosti koje se nalaze na svim realnim površinama.

Sama tekstura definira svojstvo materijala u kakvom intenzitetu raspršuje spekularnu refleksiju, te koliko se u krajnjem slučaju „zrcali” refleksija od njega. Kada je riječ o grubom materijalu sa vrijednošću 0, odnosno crno, tada su spekularne refleksije mutne i raspršene, dok su kod glatkih materijala, gdje je vrijednost 1, oštre. [22]

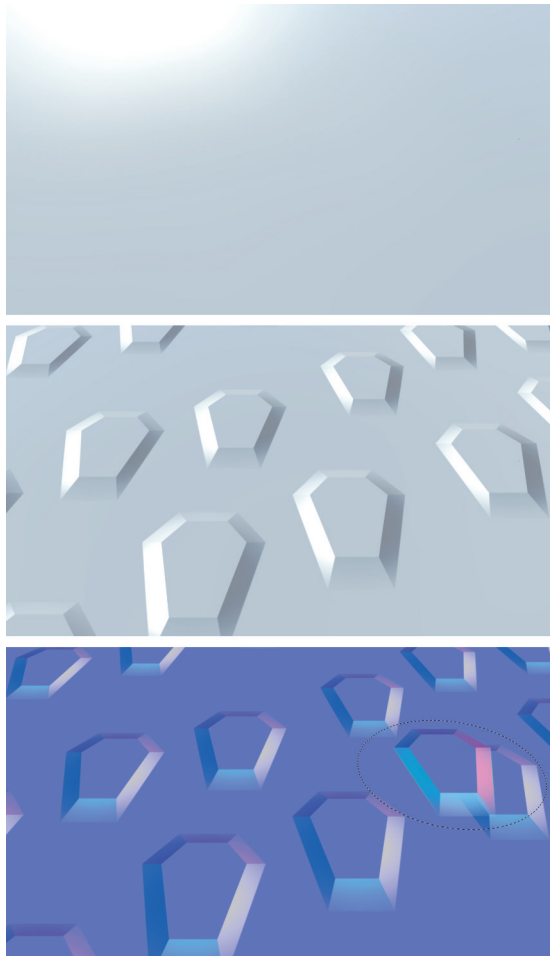
Sami zapis se može koristiti kao i u prijašnjem slučaju kod *metalness* teksture. U velikoj većini slučajeva, posebice kod manjih objekata ili ručno izrađenih predmeta, varijacije u grubosti najviše utječu na realnost percepcije objekta.



Slika 13. Primjer roughness texture,
autorov rad

2.3.4. Normala

Normal tekstura kao i *metalness* i *roughness* mapa opisuju materijal na drugačiji način od toga da mu daju boju. Prijašnje mape koje su prikazane opisuju materijal ne utječući na promjenu percepcije njegove geometrije. Da je riječ o ravnoj plohi bez detalja u *normal* teksturi, izračun svjetlosti bi bio kao da svjetlost pada na stvarno ravnu plohu. Detaljima u *normal* mapi se može promijeniti izračun putanja svjetlosti prilikom kontakta sa takvom površinom. Na taj način se može stvoriti efekt dodatnih detalja, bez prave promjene same geometrije. [26]



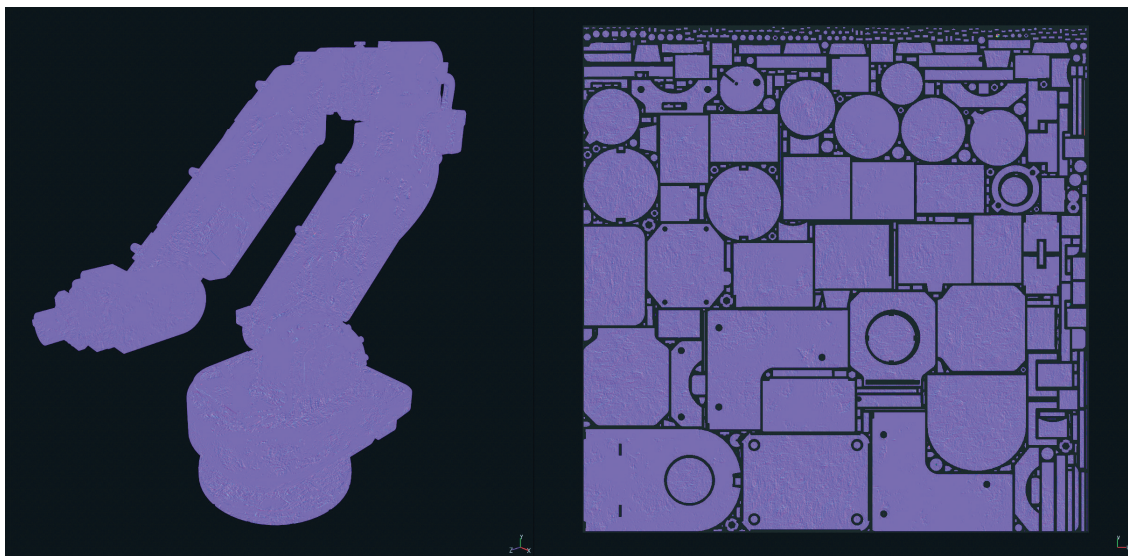
Slika 14. Primjer perceptivne promjene ravne plohe putem normal teksture, autorov rad

Svjetlost se oslanja na normale koje se očituju preko pozicije točaka i ploha, te na taj način se prilikom iscertavanja zna o kako su okrenute određene plohe, te kako reflektiraju svjetlosne zrake. Tijekom kalkulacije u *fragment shader*-u se mogu uzeti informacije o po-

ziciji normala po pojedinom fragmentu umjesto da se uzimaju pozicije normala po površini, te se na taj način može dobiti perceptivna promjena površine i refleksije svjetlosti sa nje. To je relativno jednostavan i jeftini način da se dobije dodatna razina detalja, te se najviše koristi u pravovremenom iscrtavanju. Razlog tome je što je originala površina ostala nepromijenjena, već su se promijenili ulazni parametri prilikom kalkulacije svjetlosti. [26]

Najčešće se u teksturama mapiraju R, G, B vrijednosti ili crno-bijele vrijednosti. U slučaju *normal* tekstone se mapiraju X, Y i Z komponente koje zapravo odgovaraju koordinatnom sustavu unutar 3D prostora, te se na taj način normale mogu ispravno orijentirati. Najčešće mape izgledaju plavkasto, što odgovara vektoru normale okomite na kameru, odnosno pogled promatrača. Ostale vrijednosti se mijenjaju s obzirom na to gdje u prostor pokazuju te plohe. Na taj način mogu biti orijentirane tako da gledaju od z ili prema z osi, time dobivajući efekt dubine na određenoj površini. [26]

S obzirom na implementaciju u različitim sustavima može doći do mijenjanja vrijednosti koordinata same *normal* tekstone. U slučaju OpenGL sustava je tada riječ o pozitivnim vrijednostima svih osi, dok za DirectX sustav se koristi negativna vrijednost zelene osi, odnosno zelenog kanala koji dogovara y osi. [27]



Slika 15. Primjer *normal* tekstone,
autorov rad

Krajnja tekstura koja se koristi je na prvi pogled manje jasna od ostalih, ali uvelike pridonosi definiciji površine, odnosno materijala. Sami format zapisa je unutar RGB prostora gdje svaki kanal odgovara određenoj koordinati. Samim time, u pravilu se zapisuju kao 16-bitni zapisi zbog toga što vrlo brzo može doći do problema sa manjim pros-

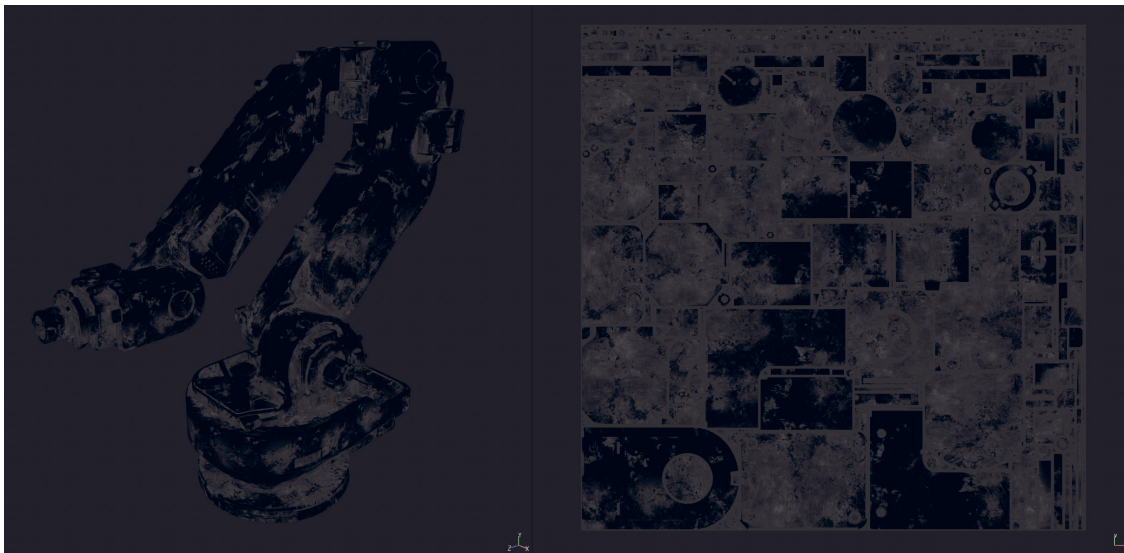
torima bojama, kompresijom i neželjenim šumom koji se jasno uočava prilikom iscrtavanja. Također, većina modernih programa za iscrtavanje pretpostavlja da će biti u 16-bitnom zapisu tako da je automatski može pravilno procesirati.

Jedna od stavki *normal* teksture je da se koriste linearizirane, odnosno da nemaju aplicirane gama korekcije. U suprotnom se mogu manifestirati greške prilikom iscrtavanja.

2.3.5. Visina

Height teksture se vrlo često koriste u različitim kombinacijama i sa različitim krajnjim procesima iscrtavanja. Generalno gledano, *height* teksture se sastoje od crno-bijelog zapisa koji sadrži vrijednosti ovisne o rasponu bita zapis. Često se koriste proceduralne mape prilikom generiranja ili se mogu izrađivati mape prilikom izrade samih materijala u programima za autoriziranje digitalnih materijala. [28]

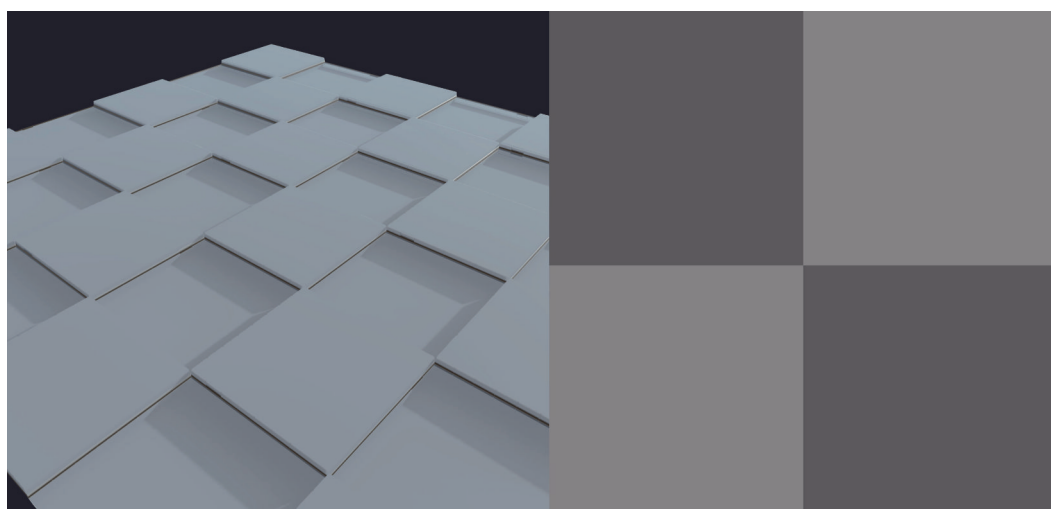
Glavni cilj *height* teksture je dobiti crno-bijelu sliku koja će reprezentirati visinu pojedinih dijelova materijala u odnosu na njihovu osnovnu razinu, relativno slično kao i kod *normal* tekstura. Razlika je u tome što *normal* teksture pokazuju kut pod kojim je površina orijentirana unutar svijeta, dok *height* tekstura isključivo zapisuje udaljenost elemenata od početne vrijednosti prema kameri. Tako da bijela područja na *height* teksturama označavaju koliko je visoka određena vrijednost, sa bijelom najvišom, dok crna područja odgovaraju dubinama s krajnjom crnom kao najdubljom točkom. [28]



Slika 16. Primjer height teksture kao dodatna definicija materijala, autorov rad

Height teksture se vrlo često koriste u kompleksnijim efektima poput *displacement mapping*-a. Tim efektom se mogu postići visoke kvalitete iscrtavanja detalja.

U pozadini se odvijaju matematičke operacije pomoću vektora koji računaju najkraću udaljenost od točke A do točke B. [29]. U računalnoj 3D grafici se s obzirom na implementaciju za vrijeme iscrtavanja također odvijaju procesi dijeljenja (eng. *tessellation*) geometrije pomoću *tessellation shader*-a. To su također resursno najskuplje operacije koje se mogu raditi po pitanju manipulacije materijalima, jer za razliku od *normal* tekstura ili klasičnih *bump* tekstura, doslovno modificiraju geometriju dodavajući točke te ih transformirajući putem *displacement* vektora. [30]



Slika 17. Primjer height teksture i tehnike *displacement mapping*-a, autorov rad

Tehnike *displacement mapping*-a su vrlo česte u uporabi prilikom *ray tracing*-a, gdje je kvaliteta od iznimne važnosti, te gdje će se krajnji proizvod pregledavati izvan pravog vremena. U slučaju pravovremenog crtanja grafike, tehnika *displacement mapping*-a je previše zahtjevana po pitanju korištenja memorije, te vremena računanja, te se kao takve ne koriste, iako se s razvojem računalnih aplikacija počinju pojavljivati različite implementacije u pravovremenom iscrtavanju. [31]

Na drugu stranu, informacije o visini se ne odbacuju, nego se često koriste u kombinaciji sa *normal* teksturama kako bi se dobila veća razina detalja na materijalima. Takvi materijali su također pogodni za pravovremeno crtanje. [32]

Same teksture se zapisuju kao crno-bijeli zapisi pretežito 16-bitni ili 32-bitni zapisi kako bi se zadržala što veća kvaliteta informacija.

U većini slučajeva, navedene teksture koje sačinjavaju materijale su u pravilu dovoljne kako bi se sami materijali mogli kvalitetno prikazati. Naravno, s obzirom na implementaciju i zahtjeve, količina tekstura se može proširiti i smanjiti, te se mogu kombinirati različiti materijali kako bi se dobili kompleksniji materijali. Sa time na umu, navedene teksture se može smatrati kao osnovama za većinu materijala koji se potom mogu koristiti u pravovremenom crtanju.

2.3.6. Tipovi tekstura

Kao što je već spomenuto na početku, teksture se mogu smatrati različitim tipom podataka koji na neki način obogaćuju primarnu geometriju u kombinaciji sa *shader*-ima koji ih kontroliraju. Često dolazi do pojavljivanja termina foto-sken tekstura, ponavljajućih tekstura (*eng. tileable textures*) i proceduralnih tekstura. U nastavku će biti objašnjenje razlike između pojedinih, te zašto ih se koristi kako u konačnici ne bi došlo do konfuzije prilikom korištenja različitih termina.

Foto-sken teksture koristeći fotogrametriju je vrlo česta metoda izrade tekstura koje će opisivati određeni materijal. Riječ je o procesu snimanja pravih materijala i objekata pomoću fotoaparata, bilo profesionalnog ili pomoću kamera na mobitelima. Potom se dobivene fotografije bilo jedna ili više njih pretvaraju direktno u teksture za korištenje u programima ili se pretvaraju u punu geometriju. [33]



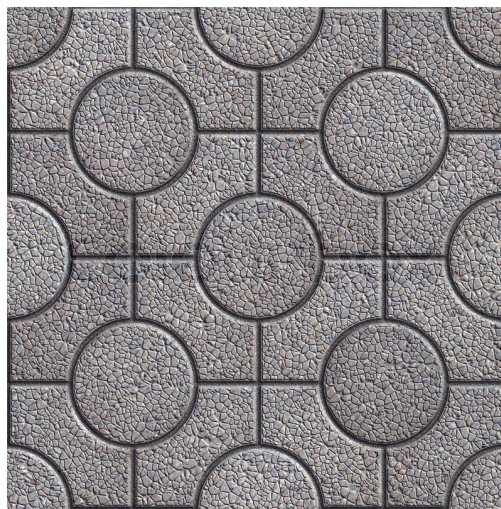
Slika 18. Primjer materijala nastalog procesom fotogrametrije,
<https://polycount.com/discussion/163997/photogrammetry-textures>

Uz pravilnu kalibraciju, te poznavanje rada sa programima za obradu dobivenih fotografija i manipulacije materijala, mogu se stvoriti teksture koje opisuju materijale gotovo

identično u odnosu na njihove fizikalne originale. Jedna od najpoznatiji robnih kuća namještaja, IKEA, također u svojem procesu rada koristi fotogrametrijsko skeniranje kako bi dobila kvalitetnu reprezentaciju materijala. [34]

Tileable teksture kako im samo ime govori su one teksture koje se mogu ponavljati u beskonačnost, a da se pritom savršeno nastavljaju jedna na drugu. [35]

Ovakav tip tekstura je iznimno pogodan za korištenje na vrlo velikim površinama, gdje bi mogli nastati problemi sa manjkom rezolucije. Također se često koriste u procesima proceduralnog teksturiranja. *Tileable* teksture će biti lakše za razumjeti nakon shvaćanja kako generirana geometrija prihvaća teksture na sebe, te koje su limitacije klasičnog tipa teksturiranja.



Slika 19. Primjer *tileable* teksture,

<https://www.colourbox.com/image/grey-paving-slabs-tileable-texture-image-11515458>

Proceduralne teksture su poseban tip tekstura koji nije definiran zapisom kao slikom, već matematičkim funkcijama koje zapisuju određene podatke, te se potom generiraju u vrijeme iscrtavanja. Takva tip tekstura se smatra vrlo optimiziranim jer nema potrebe za spremanjem velikog broja slika tekstura koje bi opisala određena svojstva materijala, već se prilikom iscrtavanja mogu izračunati i aplicirati određene vrijednosti. [36]

Među prvima takvim teksturama je nastala *Perlin noise* funkcija koju je implementirao Ken Perlin 1986. godine, potaknut radom na prvom filmu Tron 1981. godine, kada se 3D grafika počela pojavljivati u filmovima. [37] U to doba su svi materijali izgledali poprilično generičko, „računalno generirano”, bez velikih razlika između materijala i njihovih detalja. Tada je napisao prvu pseudo nasumičnu funkciju koja generira crno-bijela polja, nasumično odabrana. Potom se takva funkcija mogla implementirati da se prilikom

iscrtavanja spaja sa podlogom na koju je aplicirana i na taj način bi se dobila raznolikost na inače identičnim materijalima. Nakon toga se različiti tipovi proceduralnih *noise* tekstura koristi u svakodnevnom teksturiranju kako bi se ostvarila raznovrsnost detalja. [38]



*Slika 20. Primjer Perlin noise-a,
https://rmarcus.info/blog/assets/perlin/raw_perlin.png*

Ovakav tip tekstura se u konačnici može opisati kao manipulacija frekvencije vrijednosti određenih funkcija, te njihovo međusobno kombiniranje. Takvim putem je u teoriji moguće stvoriti nebrojeno mnogo različitih oblika i uzoraka koji na različite načine mogu utjecati na texture materijala. [39]



*Slika 21. Slika teksturirana tileable i proceduralnim teksturama,
autorov rad*

Određeni programi poput Adobe Substance Designer-a omogućuju izradu i manipulaciju materijala koji su u potpunosti generirani proceduralnim vrijednostima i funkcijama. Također se kao krajnji produkt, ovisno o implementaciji, sami materijali mogu koristiti proceduralno, gdje se izračunavaju prilikom iscrtavanja, time optimizirajući memoriju i procesorsku snagu. Ovakav tip rada omogućava veliku fleksibilnosti, mogućnost promjene i iteracije jednog materijala, time dobivajući velike varijacije osnovnog materijala. [40]

2.4. UV Mapiranje

Kako bi se određeni materijal ili teksture aplicirale na 3D objekt potrebno je specificirati površinu objekta koja će prihvatiti danu teksturu ili materijal. Kako bi se to moglo dogoditi, potrebno je jednoj površini, poligonu (*eng. polygon*) zadati određene koordinate po kojima će se sama slika projicirati. Kako je riječ o jednom poligonu koji se sastoji od četiri točke (*eng. vertex*) one će zauzeti parove koordinate s vrijednostima nula, jedan ili kombinacijom istih. [41]

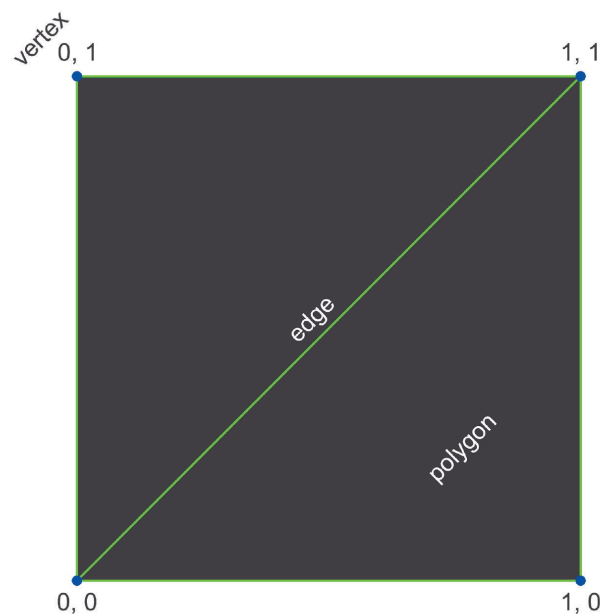
Potom se slika normalizira unutar zadanih koordinata. Kako bi se sama tekstura prikazala na 3D modelu, sljedeće je potrebno odrediti vrijednosti koje će se prikazati u procesu prikazivanja 3D modela sa teksturom. S obzirom na poziciju na ekranu, evaluira se svaki vidljivi piksel unutar zadanih koordinata na samome poligonu. Putem različitih metoda sabiranja određuje se vrijednost na zadanom pikselu, te na taj način, taj piksel poprima određenu boju. [41]

Ovako se mogu odrediti vrijednosti zadanih piksela u svakome trenutku kada se oni pojavljuju na ekranu. Može se primijetiti kako je sami pogled kamere važna komponenta prilikom izračuna vrijednosti piksela. Također, to može dovesti do određenih anomalija u prikazu pri određenim kutovima gledanja. [15] Postoje brojne metode kako se teksture mogu aplicirati na različite geometrijske oblike, ali u suštini je ovo način na koji se određuje kako će se tekstura mapirati na određenu 3D geometriju.

2.4.1. Proces UV mapiranja

Sami proces određivanja koordinata 3D geometrije u 2D prostor koji se pruža od nula do jedan se naziva procesom UV mapiranja (*eng. UV mapping*), gdje U zapravo označava x os, dok V označava y os klasičnog koordinatnog sustava. [42] Drugim riječima, ovaj proces se odnosi na pretvaranja 3D objekta u 2D površine, kao da se odmotava plašt.

U konačnici ovaj proces je relativno jednostavan, ali treba obratiti pozornost na određene elemente samog procesa koji mogu uzrokovati probleme prilikom prihvaćanja tekstura. Jedna od posljedica procesa UV mapiranja je povećanje samog broja točaka koje čine određeni model. Ovo je posebice bitno kada je riječ o sustavima kod kojih je potrebno iscrtavanje u realnom vremenu. Kako će u nastavku biti prikazano, unutar jednog UV prostora se mogu nalaziti mnogi 3D oblici. Tako rastavljene površine, plaševi, se smatraju UV otocima (*eng. UV island*), te na mjestima gdje su odrezani se iste točke iscrtavaju više puta, time povećavajući broj točaka u krajnjem procesu iscrtavanja. [43]

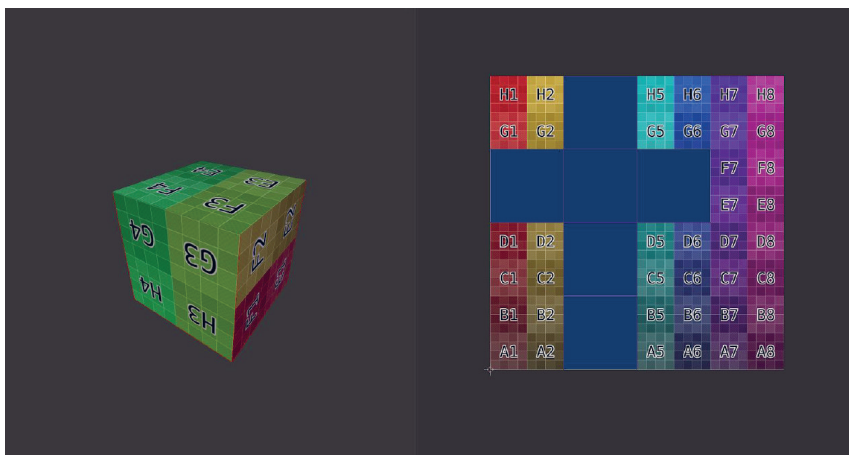


Slika 22. Koordinate 3D modela jednog poligona unutar UV prostora, autorov rad

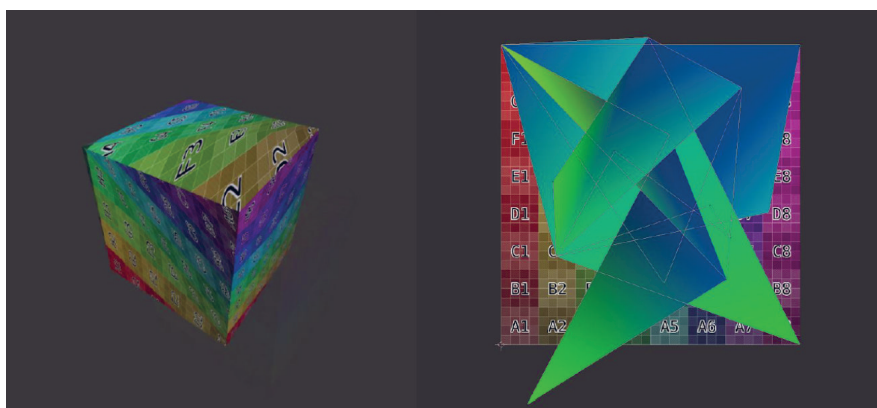
Sljedeće dvije slike prikazuju kako izgleda kada se određena tekstura, u ovome slučaju testna tekstura (sa jasnim podjelama i brojevima) mapira na jednostavno geometrijsko tijelo poput kubusa. Može se primijetiti kako na prvoj slici (slika 23.) tekstura izgleda relativno dobro. Na drugu stranu, druga slika (slika 24.) izgleda kao da se tekstura na određenim dijelovima u potpunosti deformirala. Takav tip deformacije je čest u krivo mapiranim 3D objektima. Problem nastaje u tome što se određeni poligoni same kocke deformiraju u UV prostoru. Na slici 4. se može vidjeti kako izgleda trenutna UV mapa ovoga modela.

Na prvoj slici (slika 23.) se može vidjeti kako izgleda mapa pravilo mapirane kocke sa svim stranicama. UV mapa te kocke više manje podsjeća na plašt koji se dobije kada

se prava kocka od papira razmota u plašt. Može se primijetiti kako određeni dijelovi tek-
sture naglo prestaju, te se pojavljuju drugi, poput bloka H3 i F1. Oni na teksturi nisu jedan
pored drugoga, a na samom 3D modelu izgledaju kao da jesu. Riječ je o čestom slučaju
pojave linija reza (*eng. seam*). *Seams* služe kako bi se označili rubovi modela koji su unu-
tar UV prostora slobodni, odnosno, nisu tada povezani sa ostatkom koji čini geometriju.



*Slika 23. Pravilno mapirani kubus,
autorov rad*

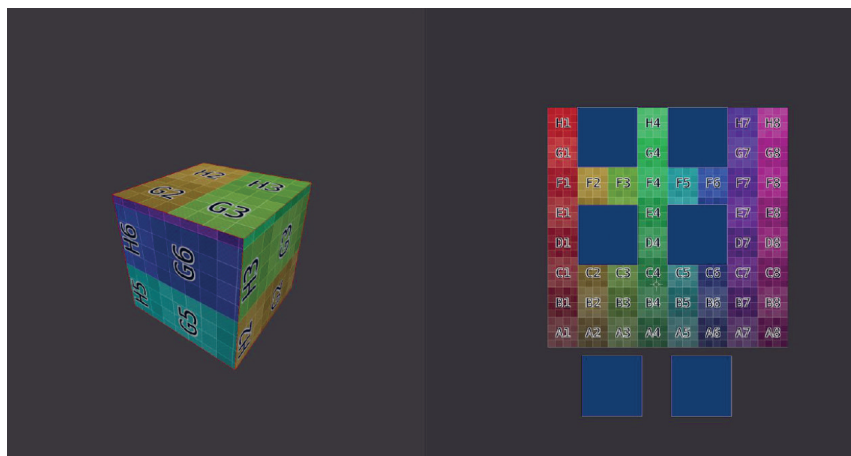


*Slika 24. Nepravilno mapirani kubus,
autorov rad*

Takav tip rada je rezultirao pravilno odmotanom geometrijom koja je u svojem UV
prostoru cjelovita. Drugim riječima, cijela UV mapa se smatra jednim otokom, jer ne pos-
toji poligon samog modela koji je označen po svim stranicama sa *seam*-ovima. Na taj
način bi se cijeli jedan poligon mapirao zasebno. Sama pojava linija reza je neizbježna
ukoliko se model želi adekvatno mapirati, analogno papirnatom modelu kubusa. Ne pos-
toji način na koji bi se taj kubus mogao odmotati bez da mu se ne prerežu određeni rubovi

stranica. Linije reza se u pravilu sakrivaju, tako da se stavljaju na ona mjesta koja neće biti vidljiva u samome kadru koji se iscertava.

Može se primijetiti kako sada svaka stranica, odnosno poligon kocke zadržava svoj prostor, neovisno o drugim poligonima u UV mapi. Na taj način se također povećao broj samih točaka koje opisuju određeni model kada dolazi vrijeme iscertavanja. Sada se vizualno može prikazati zbog čega dolazi do toga, jer sa lijeve strane geometrija kocke ima 8 točaka koje je opisuju, dakle njeni vrhovi. Sa desne strane, unutar UV mape, mogu se izbrojiti 24 točke koje opisuju UV mapu. Dakle, svaka početna točka se podijelila tri puta, a one, i dalje u osnovni zauzimaju isti prostor. Također se može primijetiti kako određeni otoci izlaze van prostora koji propisuje UV mapa. Ovo je jedna od značajki UV mapa (ukoliko nije drugačije specificirano, te se tada nazivaju UDIM) gdje je ona zapravo beskonačna. Ispod osnovnog prostora gdje se vidi tekstura, se zapravo nalazi još jedna takva tekstura. Tako se ona ponavlja u svim smjerovima, po obje osi. Ovo svojstvo se često koristi kako bi se dobila efektivno veća rezolucija prikaza, korištenjem teksture manje rezolucije koja je ponavljajuća u svim osima.



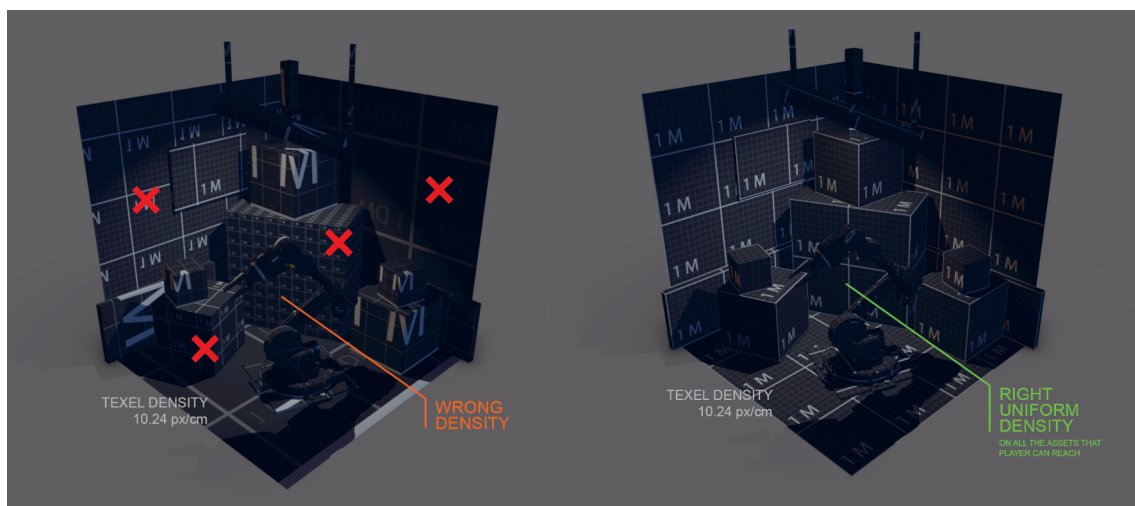
Slika 25. Prikaz kubusa sa svakom plohom kao zasebnim otokom, autorov rad

Još jedna situacija koja se može dogoditi prilikom rada sa UV mapama, koja se samo u iznimnim slučajevima smatra korektnom, je preklapanje samih poligona unutar UV mape. Samim time, poligoni zauzimaju isti prostor, te na taj način zapravo primaju istu informaciju od dane teksture. Ponekada se to može također iskoristiti u svrhu optimizacije, poput slučajeva kada je riječ o zrcaljenju modela, gdje su lijeva i desna strana identične, te trebaju primiti jednake informacije.

2.4.2. Gustoća tekstura

Gustoća tekstura (*eng. texel density*) je usko vezana uz krajnji izgled objekata, te samu pripremu modela za teksturiranje, bilo unikatno teksturiranje ili uporabom proceduralnih materijala i tekstura. *Texel density* se često naziva *pixel ratio*, a razlog tome je što se zapravo pokušava napraviti sustav koji prati koliko će određeni modeli, te njihove teksture i materijali pokrivati krajnji izlazni uređaj, u pravilu digitalni zaslon. Sami naziv *texel* je deriviran iz riječi piksel (*eng. pixel*), te se *texel* smatra najmanjom jedinicom informacije od kojega se sastoji materijal ili tekstura. [44]

Cilj kvalitetnog *texel density*-a se najbolje može prikazati u izradi velikih okoliša (*eng. environments*). Kako je riječ o sustavu kojeg sačinjava veliki broj modela, materijala, te varijabilnih veličina, vrlo brzo može doći do problema prilikom izrade modela i materijala koji trebaju sačinjavati takav sustav. Najčešći problemi koji se mogu primijetiti je da određeni dijelovi okoliša izgledaju previše detaljni i prevelike rezolucije naspram drugih elemenata istog okoliša, te obratno. Pravilan *texel density* pokušava riješiti taj problem tako da su svi elementi koji sačinjavaju jedan sustav u jednakim omjerima s obzirom na rezoluciju i pokrivenost detaljima, kako bi se zadržala perceptivna konzistencija kvalitete samog okoliša. [45]

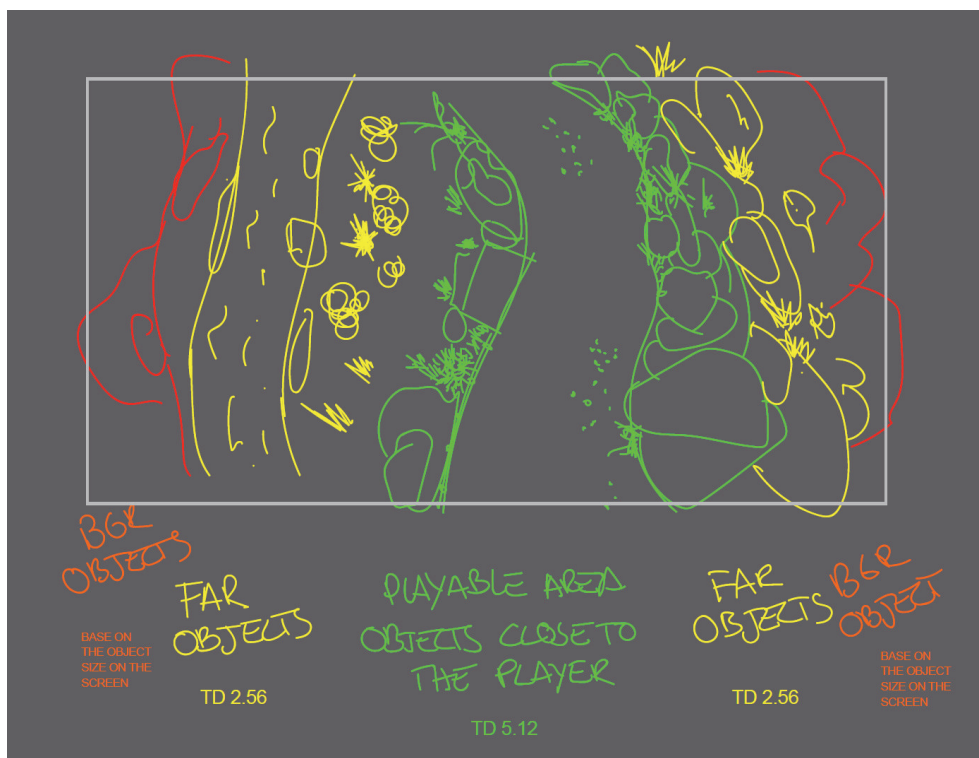


Slika 26. Prikaz nepravilnog (lijevo) i pravilnog (desno) *texel density*-a,
Iezzi, L. *Texel Density*, <https://www.leonano.com/>

Prilikom izrade modela, odnosno prije UV mapiranja, se mora odrediti kolika će biti referentna veličina u zadanom okruženju, bilo igri, filmu ili statičnoj vizualizaciji. U pravilu se uzimaju vrijednosti koje su jednostavne za razumjeti, te potom za računati, poput

površine veličine 1 x 1 metar. Nakon toga se na njoj određuje koju najveću rezoluciju takav model može imati. Potom se svi drugi elementi koji su unutar istog sustava poput zadane plohe, moraju kalibrirati. U slučaju da takva ploha od 1 x 1 metar može primit najveću teksturu veličine 1024 piksela, tada se govori o *texel density*-u od 10,24 piksela po centimetru. Nakon toga se svi dijelovi sustava tako pripremaju za teksturiranje, da njihovi omjeri u odnosu na referentnu plohu budu u ravnoteži. Ukoliko su elementi manji od plohe, tada će pokrivati manju površinu unutar UV prostora, te ukoliko su veći, tada će pokrivati veću površinu UV prostora od referentne plohe. [45]

U takvim situacijama može doći do određenih problema po pitanju broja tekstura koje se koriste ili premale pokrivenosti UV prostora. Kako je u prijašnjim paragrafima navedeno, optimizirani UV prostor je onaj koji u što većoj mjeri popunjen u prostoru od 0 do 1. U tim slučajevima se rade različiti kompromisi poput spajanja više tekstura na jednu kako bi se očuvao zadani *texel density*, te kako bi se optimizirao UV prostor i količina potrebnih tekstura. Ukoliko je element veći onda su mu potrebne veće texture, jer nije dovoljno samo povećati rezoluciju. Tada dolazi do kršenja dogovorenog *texel density*-a što može rezultirati perceptivnom promjenom u razini detalja što ga elementi okoliša definiraju. Elementi se potom lome na manje segmente, koriste se *tileable* texture ili proceduralne texture gdje nije važno da li je sadržaj UV prostora u egzaktnim dimenzijama. [45]



Slika 27. Shema razine detalja na primjeru nivoa video igre,
Iezzi, L. *Texel Density*, <https://www.leonano.com/>

Upravo u gore navedenom slučaju, proceduralne *tileable* teksture pokazuju određene prednosti nad unikatnim teksturama. Pomoću njih se može zadržati zadani *texel density* kako bi svi elementi izgledali konzistentno, ali se također ne mora koristiti preveliki broj resursa na velike teksture koje potencijal mogu usporiti pravovremeno iscrtavanja ili zauzimati previše memorije prilikom iscrtavanja.

Naravno, ne moraju svi elementi na sceni imati jednaki *texel density* u svim uvjetima. Kada je riječ o filmskoj produkciji, tada je to manji problem jer se pokušava napraviti tako da su svi elementi što detaljniji mogući, iako se i dalje prati kompozicija da ne dođe do prezasićenosti detaljima i šumom. Sa druge strane, u pravovremenom iscrtavanju se ne može dobiti ista kvaliteta u svim segmentima. Tada se rade različiti stupnjevi detalja koji će se koristiti s obzirom na samu namjenu. Kako prioritet elementa pada, tako se smanjuje i njihov zahtjev za detaljima i rezolucijom. Na taj način se mogu optimizirati teksture i materijale, zadržavajući konzistenciju. [44]

Iako postoji mnogo alata koji olakšavaju prilagodbu elemenata, vrlo je često da se manualno kalibriraju. Također se većina dijelova odokativno određuje.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada se sastoji od prikaza više načina izrade fizikalno baziranih materijala. U nastavku će biti opisane tehnike i procesi korišteni kako bi se mogli izraditi fizikalno bazirani materijali. Koristiti će se tri tehnike izrade prevođenja digitalnih snimaka u digitalni materijal, te jedna tehnika proceduralne izrade materijala.

Iako postoje gotovi repozitoriji fizikalno baziranih materijala koji dolaze sa različitim računalnim aplikacijama, te se mogu pronaći na internetu, u ovome djelu rada će se pokazati kako izrada vlastitih materijala nije kompleksan proces.

3.1. Materijal iz pojedinačne fotografije

Jedan od načina izrade fizikalno baziranih materijala je pomoću fotografije. U nastavku će biti prikazan i objašnjen način rada prilikom izrade materijala pomoću jedne fotografije. Ovo se može smatrati najjednostavnijim načinom izrade fizikalno baziranih materijala, te je sami proces vrlo sličan izradi materijala, odnosno tekstura, prije korištenja fizikalno baziranih materijala i procesa iscertavanja. Kao izvori informacija se u teoriji mogu koristiti bilo kakvi slikovni zapisi kako bi se stvorio sami materijal. Cilj ovoga pristupa je prikazati kako se relativno brzo i ekonomično može izraditi unikatni materijal s relativno visokom konačnom kvalitetom.

Za početak rada, potrebno je snimiti materijal koji se želi rekreirati u digitalnom prostoru. S obzirom da se koriste relativno automatizirane metode rada, materijali sa vrlo prepoznatljivim ponavljajućim oblicima, poput pločica ili parketa, mogu predstavljati problem. Iz toga razloga se u ovome radu kao primjer koriste prirodni oblici poput kamenih površina s nepravilnom strukturom.

Nakon što se odabere prirodni materijal koji se želi snimati, mora se obratiti pozornost na vremenske uvjete koji se pojavljuju tijekom snimanja. Naime, nije adekvatno ukoliko se pojavljuju vrlo oštre sjene na fotografiji ili ukoliko se dio slike nalazi pod jakim osvjetljenjem, a ostatak u tami. Takvi uvjeti mogu uzrokovati pogrešne kalkulacije prilikom procesa obrade fotografija u digitalne materijale. Kada su ti uvjeti zadovoljeni, materijal se snimao više puta kako bi se u post-produkciji mogli izabrati adekvatni kadrovi.

Prve fotografije snimljenog materijala sadrže X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 koji će u post-produkciji omogućiti korekcije fotografija. Sve snimljene fotografije su snimane u RAW formatu zapisa kako bi se u post-produkciji omogućile veće promjene po pitanju bijelog balansa i korekcije boja. Kako se u konačnici koristi samo jedna fotografija

za izradu materijala, nije bilo potrebe za podešavanjem otvora blende ili ostalih parametara fotoaparata. Jedino se smanjila ISO vrijednost zadržavajući mogućnost snimanja iz ruke.



*Slika 28. Primjer fotografije sa neadekvatnim jakim sjenama,
autorov rad*



*Slika 29. Referentna fotografija s X-Rite ColorChecker,
autorov rad*

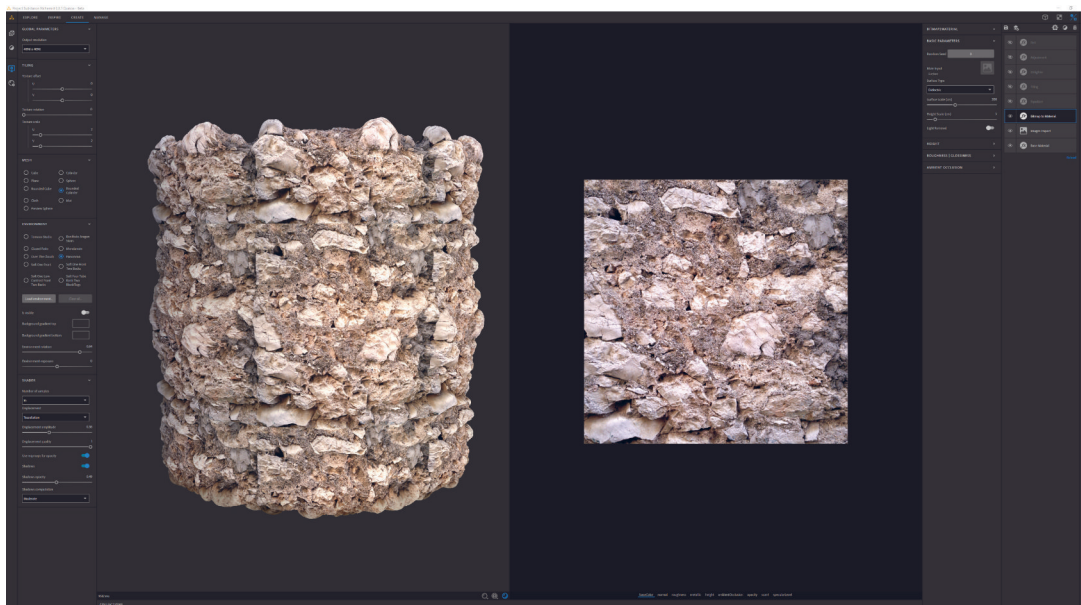
Treba napomenuti, s obzirom da se kao fotoaparat koristi kamera na mobilnom telefonu, ovisno o samoj kameri, biti će dostupne različite opcije i mogućnosti. Ukoliko nema određene funkcije poput snimanja RAW formata zapisa ili podešavanja ISO vrijednosti, tada se na beziciranim web dućanima mogu naći aplikacije kamera koje

omogućavaju takve postavke. Za vrijeme snimanja ovih fotografija je bila korištena aplikacija Open Camera. [46]

Nakon što su materijali snimljeni prema gore navedenim postavkama, sljedeće je potrebno korigirati bijelu točku fotografija i uvjeta osvjetljenja. Prema X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 su se definirale referente vrijednosti, te su se odabrane fotografije koje će služiti kao osnova digitalnom materijala korigirale. Postoji više načina kako obraditi fotografije putem referentnih vrijednosti, preko ICC (*eng. International Color Consortium*) profila, profila kamera i manualno. U ovome slučaju se radila manualna korekcija fotografija.

S obrađenim baznim fotografijama se može nastaviti sa izradom digitalnog fizikalno baziranog materijala. U ovome procesu je korišten računalni program Substance Alchemist koji je prilikom pisanja ovoga rada u beta verziji. [47]

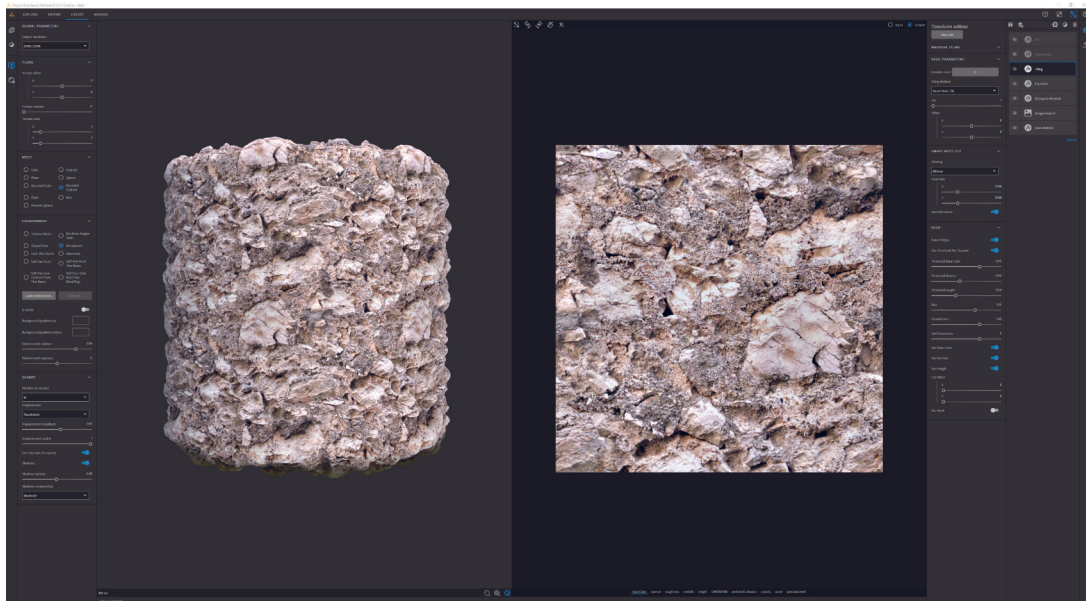
Princip rada je relativno jednostavan kada se radi sa kvalitetnom fotografijom i ne prepoznatljivim oblikom ponavljanja na samom materijalu. Željena fotografija se unese u računalni program, te on automatski napravi potrebne kalkulacije kako bi ga prikazao u trodimenzionalnom prostoru, uključujući automatsku izradu potrebnih tekstura. [48] Prilikom unošenja fotografije, program razdvaja informacija na *BaseColor* (albedo), *Normal*, *Roughness*, *Metallic*, *Height*, *Ambient Occlusion*, odnosno, već spomenute teksture u teorijskom djelu. Na taj način su definirane sve potrebne teksture za izradu osnovnog fizikalno baziranog materijala.



Slika 30. Izgled nastalog materijala nakon unošenja obrađene fotografije, autorov rad

Kako materijal nije sniman u idealnim uvjetima u samoj fotografiji se nalaze informacije o sjenama i refleksijama koje nisu poželjne u albedo teksturi jer će se dalje u procesu iscrtavanja krivo, odnosno nepoželjno protumačiti. Zbog toga razloga se osnovnu fotografiju prvo korigira s obzirom na svjetlost. U ovome procesu se odokativnom metodom putem danih alata fotografiji otklanja utjecaj svjetlosti na područja sjene i područja svjetla. [48] Na taj način se postiže kvalitetno kalibrirana albedo tekstura, jer je unaprijed balansirana po pitanju kolora i bijele točke, te sada s uklonjenim svjetlosnim informacijama.

Trenutačni materijal djeluje relativno korektno, no prilikom povećanja stupnja UV ponavljanja, može se primijeti kako se jasno ocrtavaju rubovi osnovne fotografije od koje je materijal sačinjen. Kako bi se materijal napravio *tileable* potrebno je napraviti dodatne korekcije. Ovaj postupak se u ovome slučaju, s obzirom da se radi o jednoj fotografiji, može podesiti ručno u računalnim programima za obradu fotografija poput Affinity Photo ili Adobe Photoshop. U ovome slučaju se također mogu koristiti automatske metode koje su kodirane u obliku efekata unutar samog programa. Na taj način se relativno gubi na informacijama, te može doći do nepravilnog preklapanja detalja, ali konačni efekt ponavljanja materijala je puno važniji. [48]

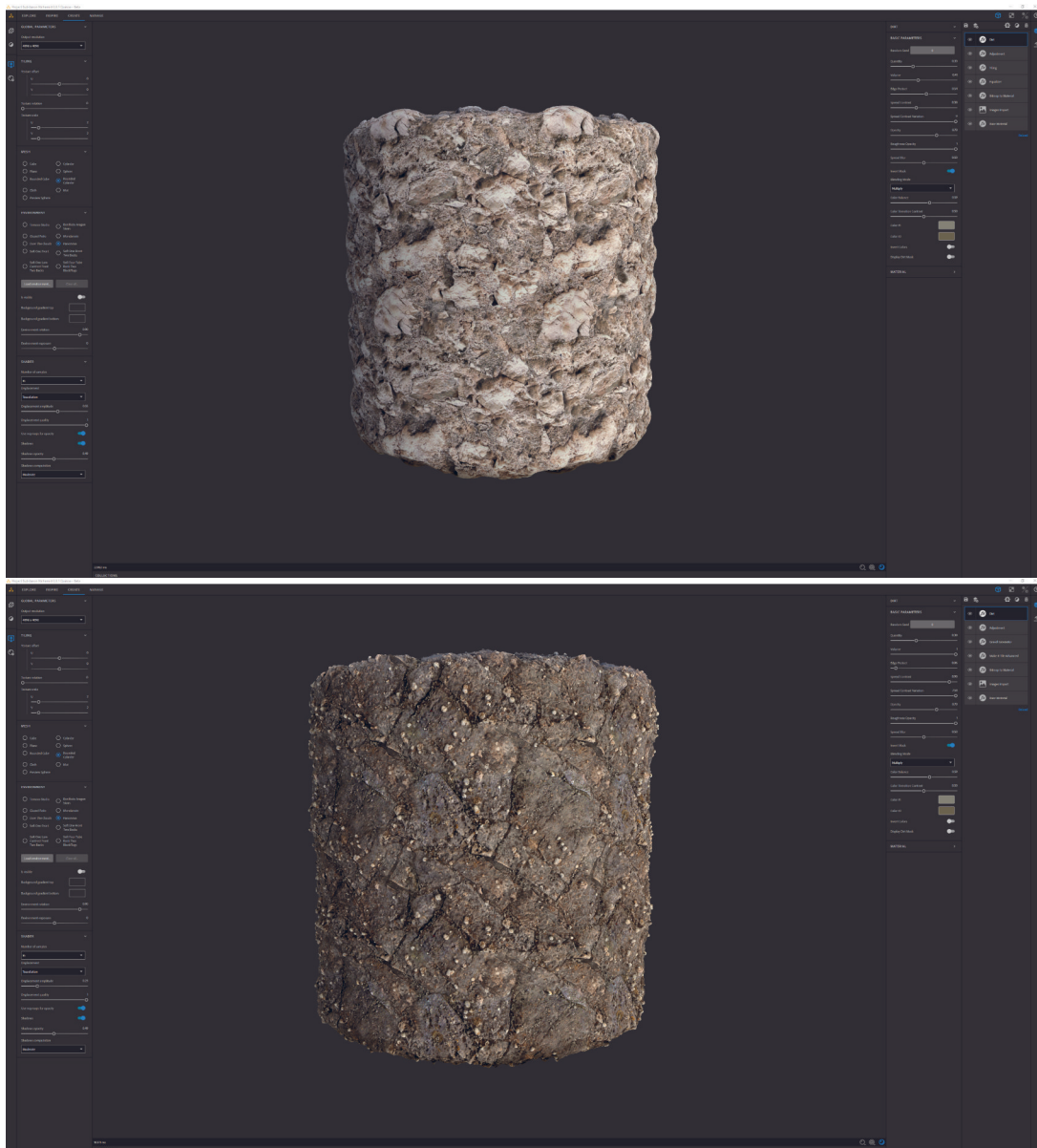


*Slika 31. Izgled materijala nakon korekcija ponavljanja slike,
autorov rad*

Ovim korekcijama se može završiti izrada osnovnog materijala koji u sebi sadrži sve potrebne texture koje ga opisuju. Kako bi se sami materijal obogatio informacijama,

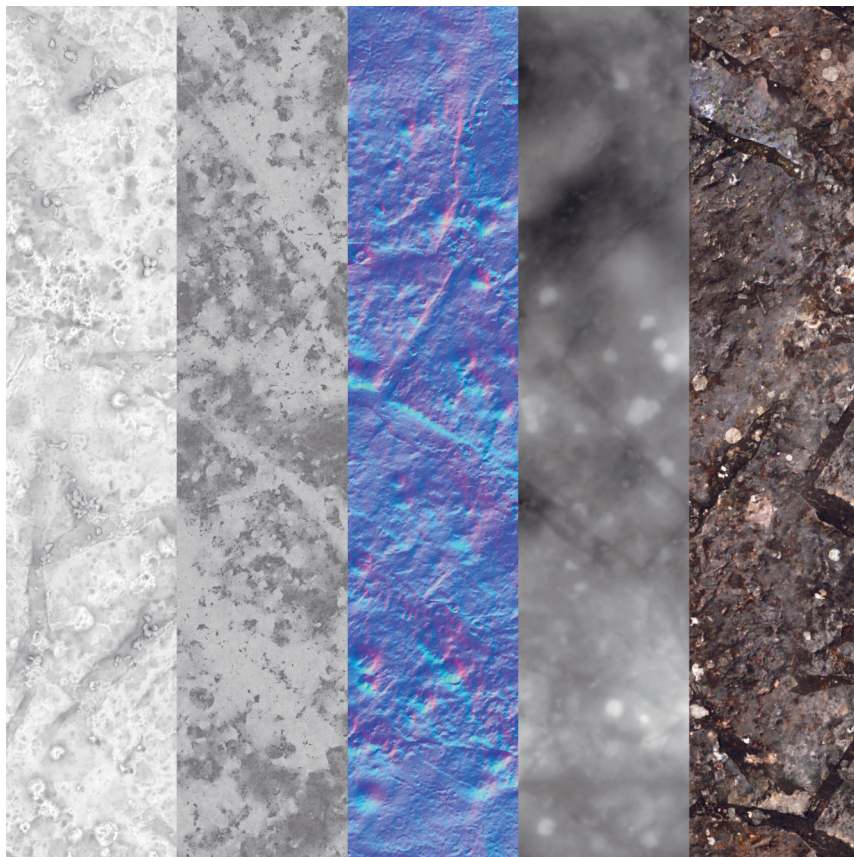
moгу se naknadno dodavati efekti poput zemlje, zmazanoće, malih kamenčića i slično. Ovakva dodavanja nisu nužna, ali dodatno upotpunjavaju završni materijal.

Ukoliko se žele korigirati ostale informacije materijala koje su automatski stvorene prilikom njegova unosa, koriste se efekti korekcije kako bi se ostale teksture mogle dodatno prilagoditi potrebi. Putem takvih korekcija se mogu sve komponente materijala dodatno prilagoditi željenoj svrsi. [48]



*Slika 32. Izgled materijala nakon željenih korekcija,
autorov rad*

Nakon što su korekcija na materijalu gotove, potrebno je dobivene teksture ili sami materijal zapisati u određenom formatu kako bi se mogao koristiti u drugim aplikacijama. Materijal se može zapisati kao serija slikovnih zapisa, odnosno tekstura koje opisuju materijal u bilo kojem fizikalno baziranom procesu iscrtavanja. Ovakav tip zapisa se koristi prilikom korištenja u računalnim programima poput Blender-a. Također se materijali mogu zapisati u privatni Substance format koji određeni računalni programi mogu koristiti poput Substance Painter, Substance Designer i Unreal Engine 4. Tip zapisa koji se koristi je određen krajnjom aplikacijom u kojoj će se materijal upotrijebiti. [48]

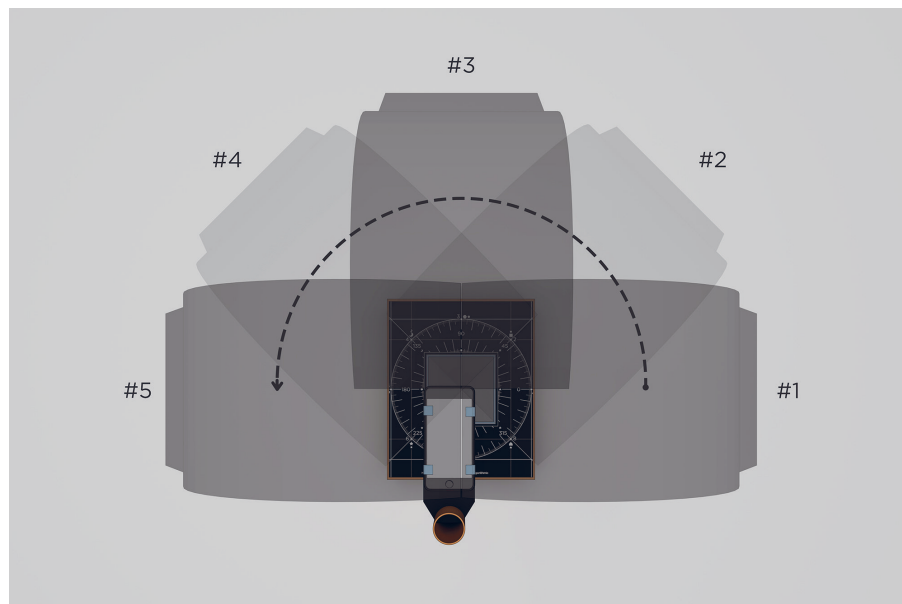


Slika 33. Izgled tekstura potrebnih za definiciju izrađenog materijala, autorov rad

Kao što se može primijetiti, izrada materijala iz jedne fotografije nije komplicirani proces zahvaljujući velikom napretku digitalnih alata za manipuliranje materijalima. Ovakav proces se također može provesti u drugim digitalnim alatima, bilo automatski ili manualno. U konačnici, prioritet je samo da materijal zadovoljava uvjete fizikalno baziranog iscrtavanja, te da se može upotrijebiti u raznovrsnim aplikacijama.

3.2. Materijal iz višekutnih fotografija

Materijal iz višekutnih fotografija je metoda snimanja materijala na koji pada svjetlost pod različitim kutovima. Ova tehnika je zamišljena kao snimanja materijala velikih dimenzija na jako maloj skali. Drugim riječima, materijal koji se snima se može smatrati velikim geografskim prostorom poput planine ili krajobraza. Svjetlost koja se koristi se može smatrati suncem koje obasjava dani prostor u određenim dobima dana. Kako svjetlost pada na teren pod određenim kutovima, tako sami teren, odnosno materijal, stvara određenu sjenu. Tim procesom se ocrta reljef samog terena, a u ovom slučaju materijala koji se snima. Ukoliko se kombinira veći broj snimaka, najmanje četiri za četiri različita kuta svjetlosti, algoritam procesa unutar računalnog programa, može spojiti fotografije kako bi se opisao reljef materijala, time ga rekreirajući. [49]



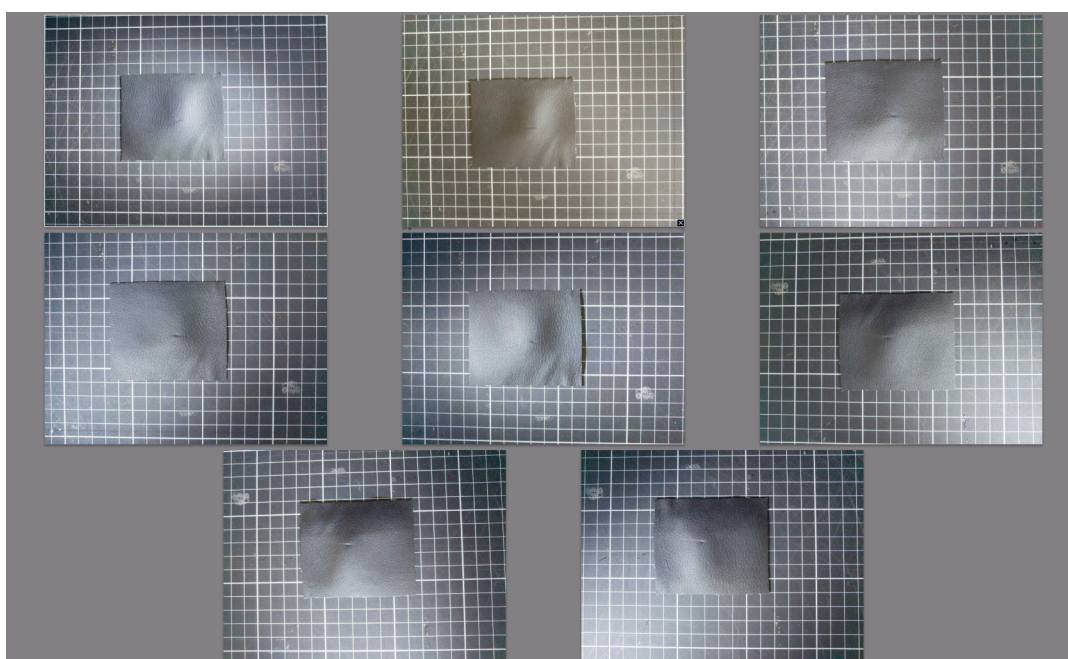
Slika 34. Shema snimanja uzorka materijala,

<https://www.substance3d.com/blog/your-smartphone-material-scanner-vol-ii>

U ovome slučaju uzorak materijala koji se snima je relativno maleni, otprilike kocka sa stranicama od 8 cm. Kako bi se postigao efekt pomicanja svjetlosti oko materijala koristi se bljeskalica drugog mobilnog telefona, koja se za svaku fotografiju okrene za 45 stupnjeva oko ishodišta uzorka materijala. S obzirom da se radi o većem broju fotografija koji je potreban, u ovome slučaju 8, treba obratiti pažnju na postavke fotoaparata mobilnog uređaja. [49]

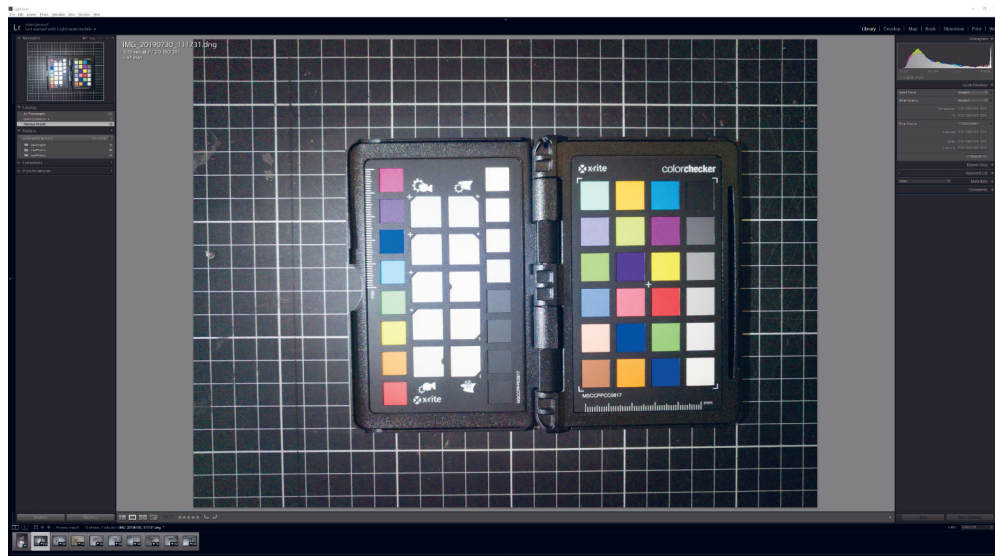
Prilikom ovog snimanja materijala svjetlost je bila relativno kontrolirana. Snimanje se odvija u zamračenoj prostoriji bez direktnog pada vanjske svjetlosti na uzorak materijala. Na taj način, bljeskalica drugog telefona je jedini izvor direktnog svjetla na sami materijal. Materijal se snima na crnoj podlozi koja sadrži pravilan uzorak bijele boje. Taj uzorak će u post-produkciji pomoći algoritmu da jednostavnije spoji zadane fotografije. Prije samog snimanja uzorka materijala, potrebno je snimiti fotografiju sa X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 koja će poslužiti za korekciju boja i bijele točke prije nego što se počne stvarati digitalni materijal. U ovome slučaju je dosta osvijetliti X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 iz jednog kuta pomoću bljeskalice drugog telefona.

Sa snimljenom referentnom fotografijom X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 se može snimiti ostatak materijala prema navedenim parametrima. U ovom slučaju je korištena kamera u automatskom načinu rada. Iako nije savršen pristup snimanju, u ovom kontekstu i primjeru se pokazao dovoljno adekvatnim za uporabu. Prilikom snimanja prve referentne fotografije, kamera uređaja je postavila određene vrijednosti koje se prilikom snimanja samog materijala nisu mijenjale. To je postignu tako da se kamera mobilnog aparata nije pomicala sa mjesta, te se nije dodatno fokusirao kadar od početnog. Materijal je potom sniman osam puta sa svjetlom koje pada na njega iz osam različitih kutova.



*Slika 35. Fotografije uzorka materijala,
autorov rad*

Kako bi se fotografije mogle korigirati po pitanju boje i pozicije bijele točke, potrebno je provesti isti proces kalibracije na svim fotografijama. U ovome slučaju je korišten računalni program Adobe Lightroom 5.6 zbog mogućnosti sinkronizacije parametara fotografije. Korekcijom referentne fotografije s X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 se dobivaju referentne vrijednosti za ostale fotografije. Sinkronizacijom podešenja parametara sa ostalim fotografijama, sve ostale fotografije poprimaju jednake vrijednosti. Ukoliko neke fotografije izgledaju malo drugačije moguće ih je naknadno još podesiti, ali se također mogu ostaviti kakve jesu ukoliko u kasnijem stadiju izrade materijala ne dođe do velikih grešaka. [49]



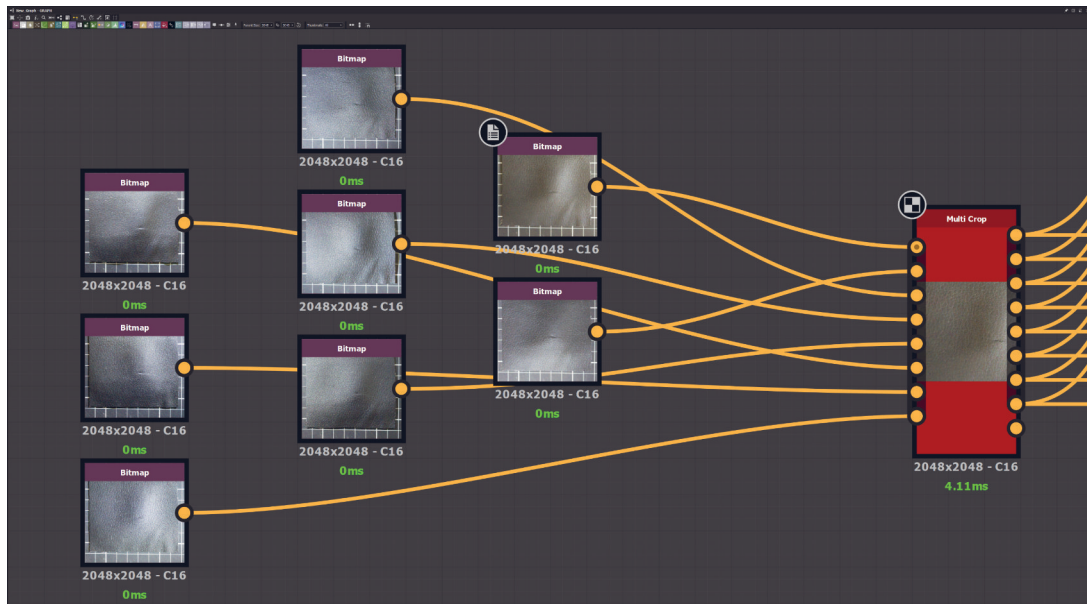
Slika 36. Referentna fotografija X-Rite ColorChecker, autorov rad

S obzirom da snimljene fotografije nisu savršeno poravnate, potrebno ih je podesiti. Jednostavnim procesom se korigirane fotografije mogu unijeti u Adobe Photoshop, te se pomoću funkcije *photomerge* mogu poravnati. Nakon što se zadane fotografije poravnaju se trebaju zapisati na medij za pohranu u obliku zasebnih fotografija. [49] U ovom slučaju su sve fotografije zapisane u rezoluciji od 2048 x 2048 piksela kao 16-bit TIF zapis.

Nakon što su fotografije pravilno obrađene može se kreirati materijal iz višekutnih fotografija. Iako se mogu upotrijebiti različiti računalni programi u ovu svrhu, u ovome primjeru će se upotrijebiti Substance Designer. [50]

Kako bi se fotografije mogle prevesti u materijal potrebno ih je povezati sa samim programom. S obzirom da ovaj program radi na temelju grafa točaka (*eng. node graph*) potrebno ih unijeti u sami graf koji će reprezentirati novonastali materijal. Fotografije

je prvo potrebno obrezati tako da se iscrtava samo željeni uzorak materijala, bez podloge za snimanje. Nakon što se fotografije pravilno obrežu, te se pronađe željeni dio uzorka na kojemu će se bazirati materijal mogu se izraditi potrebne teksture koje će opisivati zadani materijal. [49]

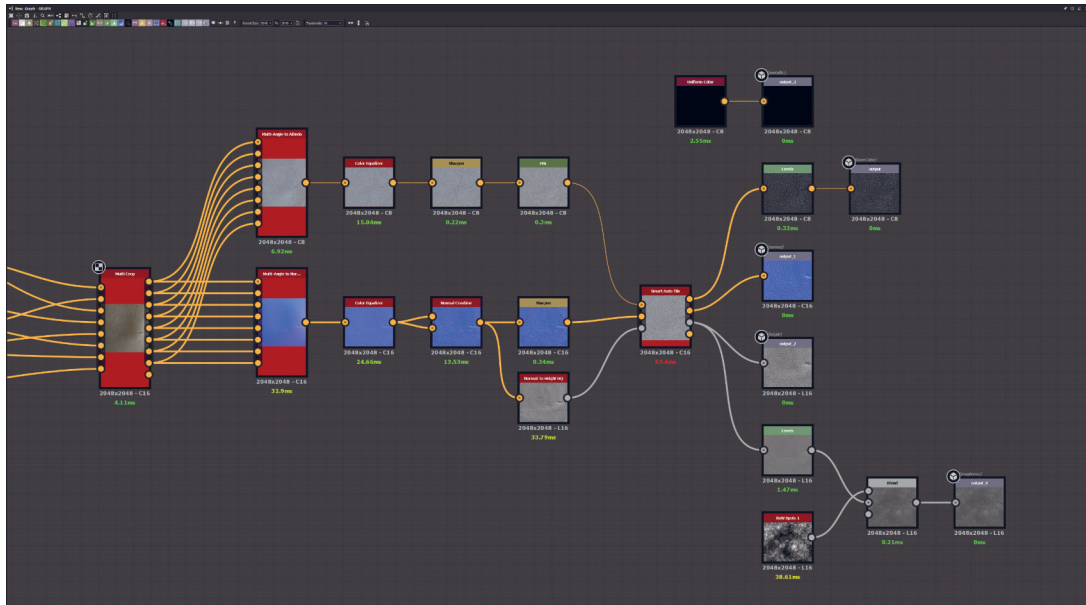


Slika 37. Spajanje fotografija putem *Multi Crop* node-a, autorov rad

Prilikom rada sa višekutnim fotografijama se prvo moraju napraviti *normal*, *height* i *albedo* teksture. One će biti zasnovane na snimljenim fotografijama, te će se pomoću njih napraviti ostale potrebne teksture za opisivanje materijala. Pomoću vrlo jednostavnih *node*-ova se iz bazičnih fotografija mogu dobiti informacije o boji i o orijentaciji normala. Uporabom *Multi-angle to Albedo/Normal* funkcije se direktno mogu generirati potrebne informacije. Uz malo korekcija poput efekta oštine, kalibracije uniformnosti boje i korigiranje kontrasta se stvaraju vjerodostojne teksture originalnom materijalu. [49] Prilikom rada se mogu raditi optimizacije na teksturama. Kako je u teorijskom djelu naznačeno *albedo* informacije se mogu zapisati kao 8-bitni zapis, te se tijekom rada u grafu takve vrijednosti mogu definirati kao 8-bitne.

Nakon izrade *albedo* i *normal* teksture se može vrlo jednostavno izraditi *height* mapa koja se potom može koristiti u više slučajeva. U pravilu se *height* teksture izrađuju tako da se *normal* teksture konvertiraju u crno-bijele slike, te im se podešavaju kontrast, ulazne i izlazne vrijednosti.

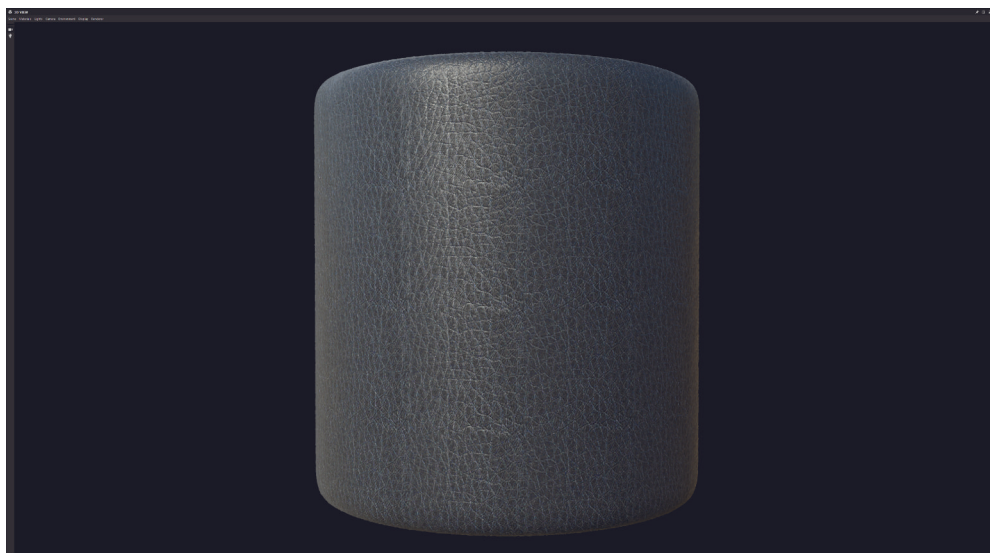
Kako je riječ o materijalu koji je izrađen putem fotografija, mogu se vidjeti rubovi samih fotografija prilikom povećanja UV vrijednosti. Iz toga razloga se kao u prijašnjem slučaju texture moraju modificirati kako bi se mogle pravilno ponavljati. Nakon uporabe funkcije *Smart auto tile* i podešavanjem postavki koje će biti različite ovisno o slučaju snimanja, se može vidjeti gotovo krajnji rezultat. Nakon toga je potrebno napraviti *metalness* i *roughness* texture. [49]



Slika 38. Prikaz node graph-a materijala,
autorov rad

Metalness tekstura je jednostavna jer je riječ o čisto crnoj slici jer u ovom primjeru nije bilo rada sa metalnim materijalima. *Roughness* texture se može napraviti na više načina ovisno o potrebi samog materijala. Osnovni pristup je napraviti crno-bijelu sliku u jednoj boji, odnosno vrijednosti. Ovakav pristup je validan ukoliko ne postoji promjena intenziteta refleksije na samom materijalu ili ukoliko ona nije primjetna. Ukoliko se želi napraviti određena varijacija informacija o refleksiji, tada se na različite načine mogu kreirati crno-bijele slike sa različitim informacijama o stupnju refleksije. Prilikom uvođenja različitih *noise* informacija i kombiniranjem sa informacija poput *height* tekstura mogu se ostvariti suptilne razlike prilikom pada svjetlosti na sami materijal.

Ovim načinom se može dobiti osnovni fizikalno bazirani materijal baziran na višestrukim fotografijama. Kreirani materijal se može koristiti kao takav ili se dalje može kombinirati sa ostalim materijalima. Također mu se mogu dodavati određeni detalji kojih nema u stvarnosti, ali mogu obogatiti sami materijal, poput različitih uzoraka.



*Slika 39. Finalni materijal uzorka lažne kože,
autorov rad*

3.3. Materijal uporabom tehnike fotogrametrije

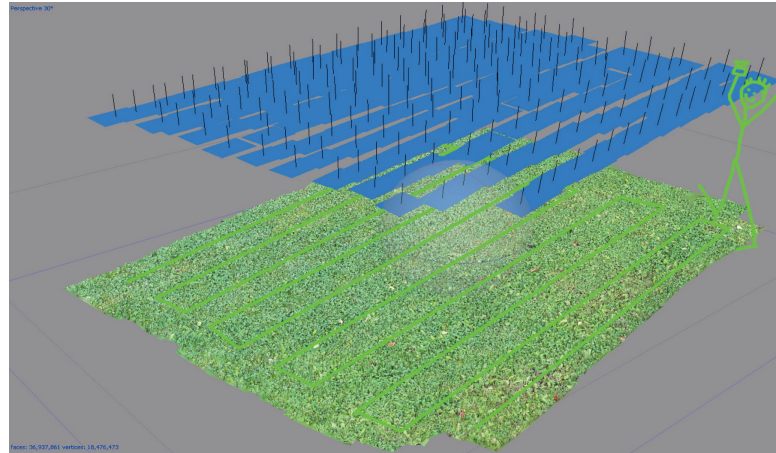
Prijašnja dva načina izrade fizikalno baziranih materijala se zasnivala na direktnom prevođenju informacija sa fotografija u digitalne materijala. Uporabom tehnike fotogrametrije se materijali stvaraju putem foto skenirane geometrije. Proces je drugačiji i kompleksniji od prijašnjih metoda izrade fizikalno baziranih materijala.

Proces se sastoji od snimanja objekata kojih se želi prevesti u digitalni materijal, te generiranje njihove geometrije pomoću računalnih programa za stvaranja geometrije s teksturama iz fotografija. U ovome primjeru će biti korišten Agisoft Metashape, iako postoji alternativa otvorenog koda Meshroom. [51, 52]

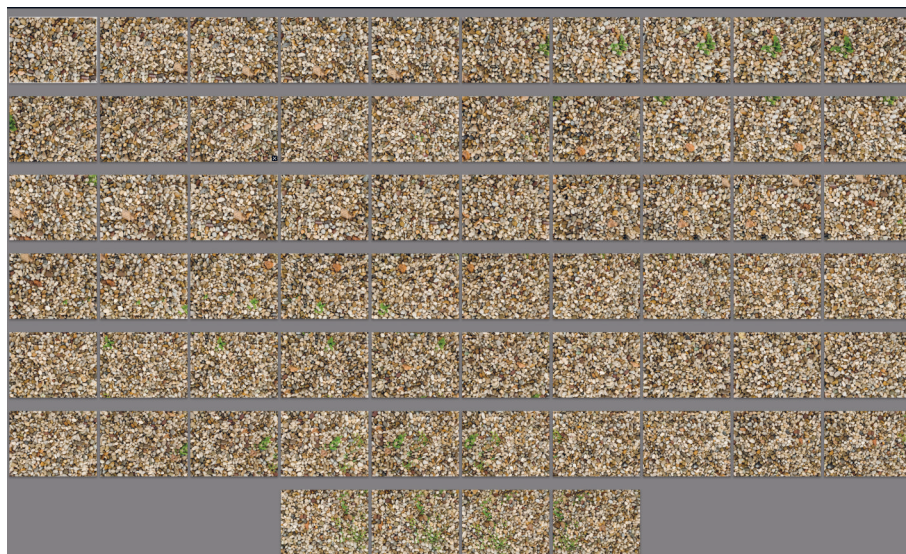
Kao i kod izrade materijala iz jedne fotografije potrebno je paziti na određene uvjete samog snimanja. U nastavku će biti prikazani primjeri snimanja koji relativno zadovoljavaju zadane uvjete. Snimanje se odvijalo tijekom oblačnog dana, što je idealno vrijeme za fotogrametrijsko snimanje. U tome slučaju nema pojave grubih sjena ili jake refleksije zbog difuznog svjetla što prolazi kroz oblake. Također, s obzirom da su fotografije snimane po danu, nema potrebe za povećanjem ISO vrijednosti koja bi inače pridonijela pojavi šuma u snimljenim fotografijama.

S obzirom da se radi o fotogrametrijskom snimanju, nije dovoljno snimiti par fotografija, već što je više fotografija određenog objekta, to će krajnja kalkulacija biti preciznija i kvalitetnija. S time u vidu, navedeni objekti su rađeni prema setovima od 22 do 60 fotografija. Fotografije su snimane prema određenom poretku, odnosno, snimale su se tako da

se prekrije željena površina u uniformnim razmacima. Također se može primijetiti da se veliki dio fotografija preklapa što je nužno kako bi algoritmi unutar programa mogli adekvatno procesirati fotografije. U pravilu se uzima da se više od polovice fotografije preklapa sa prijašnjom kako bi krajnji rezultat bio adekvatne kvalitete. [33]



Slika 40. Shema snimanja fotografija,
Baran, G., Environment PBR Texture Creation Using Photogrammetry, Gumroad, 2016



Slika 41. Redoslijed snimanih fotografija,
autorov rad

Postavke digitalne kamera su postavljene kao u prijašnjim primjerima. S obzirom na korištenu mobilnu kameru, najadekvatnijim postavkama se pokazalo snimanje u automatskom načinu rada koji se kalibrirao prema snimanju referentne fotografije s X-Rite ColorChecker Passport Photo 2. Određene aplikacije koje dopuštaju veću kontrolu snimanja su

iz tehničkih razloga imale različite probleme sa snimanjem, od smrzavanja do krive interpretacije RAW formata zapisa fotografija. Podešenom mobilnom kamerom, te razumnim redoslijedom snimanja scene ili objekata, se kao konačni rezultat dobiva niz fotografija objekata koji je dalje potrebno obraditi.

Kao kod prijašnjih načina rada snimljene fotografije je potrebno kalibrirati prema X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 putem referente fotografije. S obzirom da je riječ o velikom broju pojedinačnih fotografija koristi se računalni program Adobe Lightroom 5.6 zbog mogućnosti sinkronizacije postavki prema referentnoj fotografiji. Referenta fotografija sa X-Rite ColorChecker Passport Photo 2 se kalibrirala prema referentnim bojama koje se nalaza na uzorku. Također se podesila vrijednost bijele točke, koja se u nekim slučajevima korigirala kako bi vizualno odgovaralo stvarnim vrijednostima. S pravilno podešenom referentnom fotografijom se jednostavno postavke sinkroniziraju sa svim ostalim fotografijama u seriji.

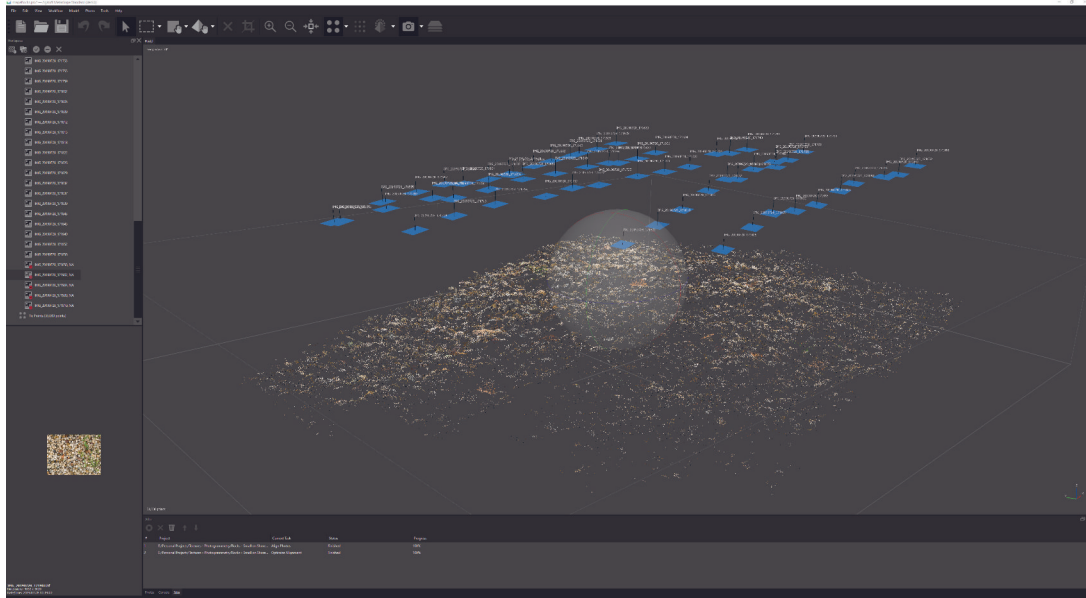


*Slika 42. Kalibracija referente fotografije,
autorov rad*

Sljedeći korak u izradi materijala je generiranje geometrije s kolor informacijama putem Agisoft Metashape računalnog programa. Ukoliko se tijekom snimanja obratila pozornost na navedene prijedloge snimanja, cijeli proces generiranja geometrije je jednostavan. [33]

Nakon što se u program unesu sve fotografije iz serije, bez referentne fotografije, prati se jednostavan tok rada koji je kodiran u samome programu. Kako bi program znao generirati geometriju potrebno je prvo poravnati fotografije, odnosno kamere, gdje će ih putem preklapanja u fotografija pozicionirati u prostor. Na taj način će znati iz kojega kuta

i pozicije je snimljena koja fotografija. Ukoliko su određene kamere odbačene, odnosno, nisu se mogle poravnati, tada se mogu odbaciti ukoliko nisu nužne ili se može smanjiti broj sličnih točaka koji se traži u svakoj od fotografija. [33]

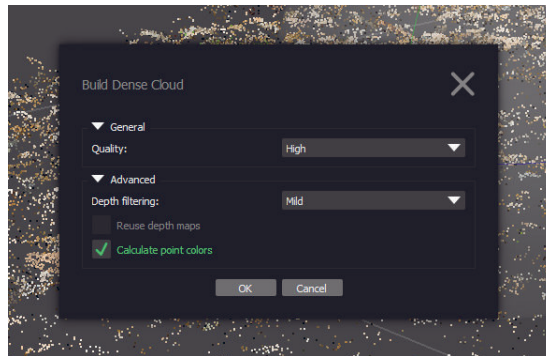


Slika 43. Proces poravnanja kamera gdje se može vidjeti par odbačenih, autorov rad

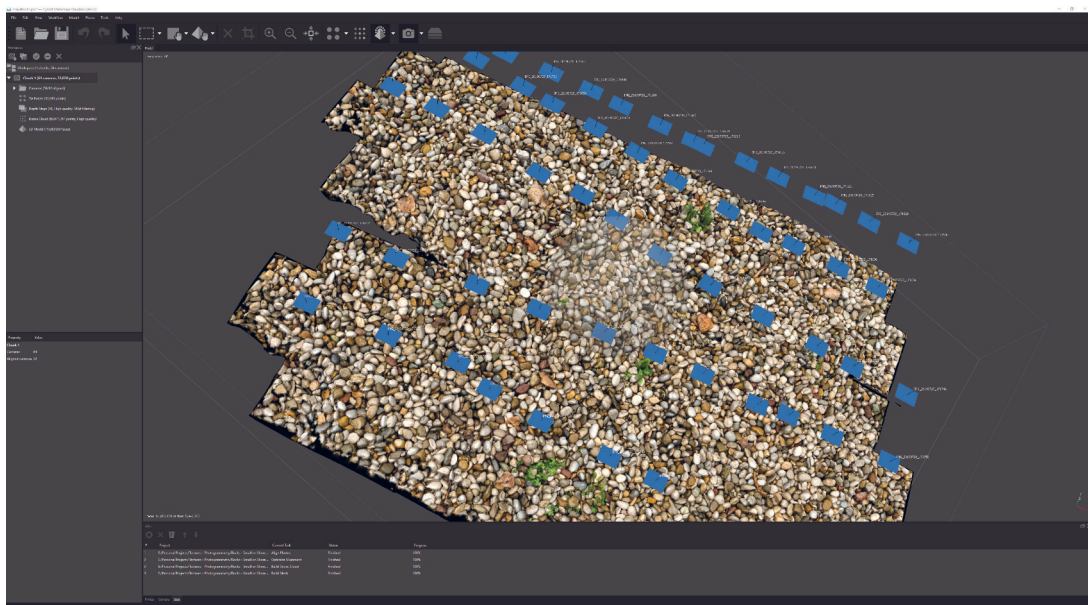
Sa kalibriranim kamerama, sljedeći proces koji može potrajati ovisno o specifikacijama sustava na kojemu se radi je izrada *point* i *dense cloud*-a. *Point cloud* i *dense cloud* su setovi informacija koje se nalaze u trodimenzionalnom prostoru. U pravilu se dobivaju pomoću skeniranja površina i objekata skenerima, ali se također mogu generirati iz niza fotografija iz kojih se može iščitati informacija o dubini putem različitih algoritama. [53] Generiranjem *dense cloud*-a će se moći kvalitetno izraditi puna geometrija. S obzirom na željenu kvalitetu i vrijeme se mogu podesiti različite postavke koje će utjecati na krajnji broj točaka koji će se stvoriti nakon proračuna. Što je više točaka u *dense cloud*-u, to će krajnja geometrija biti preciznija realnom objektu. Treba napomenuti da se prilikom generiranja *dense cloud* točaka treba generirati i informacija o boji, koja će se kasnije prevesti kao boja po određenom *vertex*-u, odnosno točki. Na taj način će generirana geometrija sadržavati albedo informacije. [33]

Završna stavka ovoga procesa je izrada geometrije sa informacijama o koloru. Jednostavnim opcijama se može podesiti kako će se generirati sama geometrija, te proces izrade traje manje nego prijašnji korak u procesu. Sa generiranom geometrijom se može vidjeti kako izgleda čista geometrija, a kako izgleda osjenčana sa informacijama koje su

generirane iz fotografija. Radi optimizacije sama geometrija se može smanjiti u broju poligona ili točaka koji je opisuju. [33] U ovim slučajevima se radila redukcija na 35% ukupnog broja poligona kako bi rad sa njima bio jednostavniji. Kao krajnji produkt je potrebno dobivenu geometriju zapisati na disk kako bi se geometrija mogla dalje korigirati u računalnim programima za manipulaciju u trodimenzionalnom prostoru.



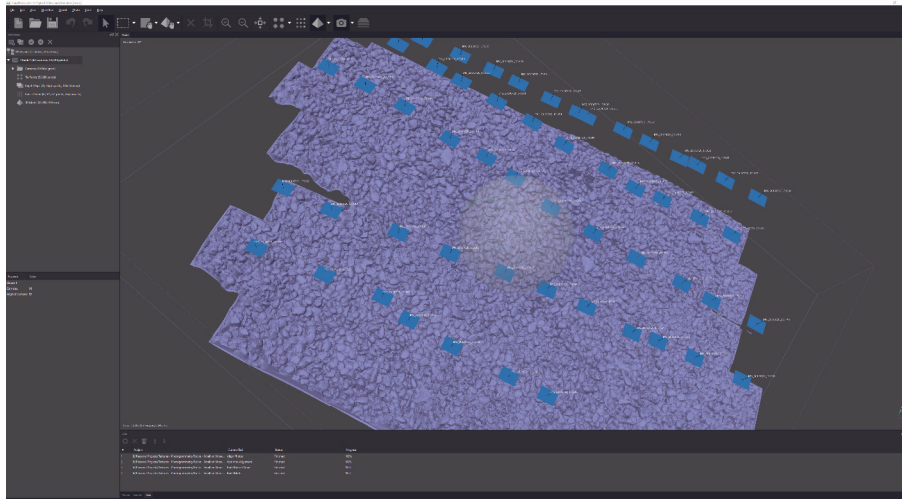
*Slika 44. Postavke izrade dense cloud-a,
autorov rad*



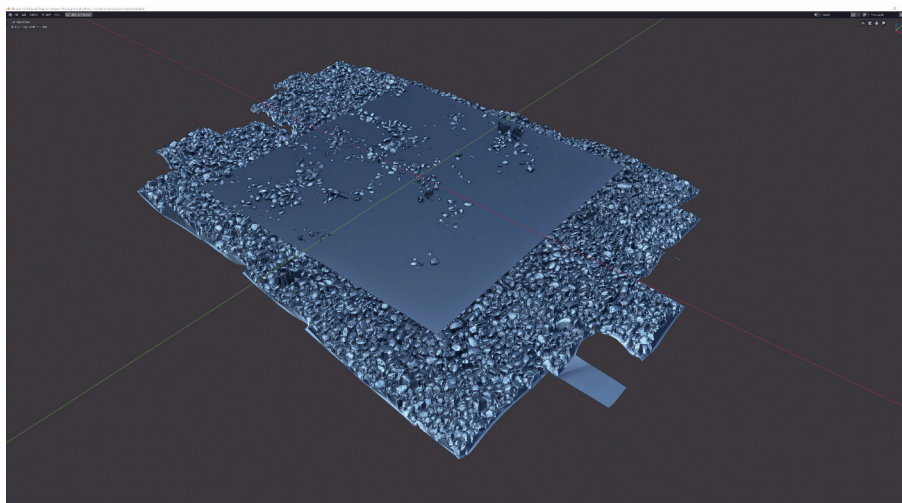
*Slika 45. Generirana geometrija s kolor informacijama,
autorov rad*

Ovakav tip geometrija koji sadrži iznimno veliki broj poligona (cca. 12.000.000) se smatra *highpoly* model, te kao takav je iznimno težak za manipuliranje ili rad sa njime. U pravilu se ovakvi modeli pretvaraju u *lowpoly* modele sa kojima je lakše za manipulirati, te u konačnici za iscrtati. S obzirom da je krajnji cilj dobiti teksture koje će opisivati ma-

terijal dovoljno je prevesti ovaj oblik u plohu jednakih dimenzija stranica, što će u konačnici odgovarati 2D slikovnom zapisu. Iz toga razloga se dobiveni model unosi u računalni program poput Blender-a gdje se uz njega stvara ploha koja odgovara realnim dimenzijama snimljenog objekta. U ovome slučaju, snimljene površine su otprilike 1 x 1 metar. Za sljedeće korake rada je potrebno pozicionirati *highpoly* i *lowpoly* model u ishodišnu točku koordinatnog sustava, te ih pravilo smanjiti, odnosno povećati kako bi se zadovoljile realne dimenzije snimljenog objekta. *Lowpoly* model koji se zapisuje na disk je ploha koja se sastoji od jednog poligona, koji svojom cijelom površinom zauzima UV prostor. Na taj način se dobiva podloga za stvaranje slika koje će reprezentirati tekstore budućeg materijala. Također se ponovno treba zapisati korigirani *highpoly* model zbog promjena njegove ishodišne točke i same veličine.



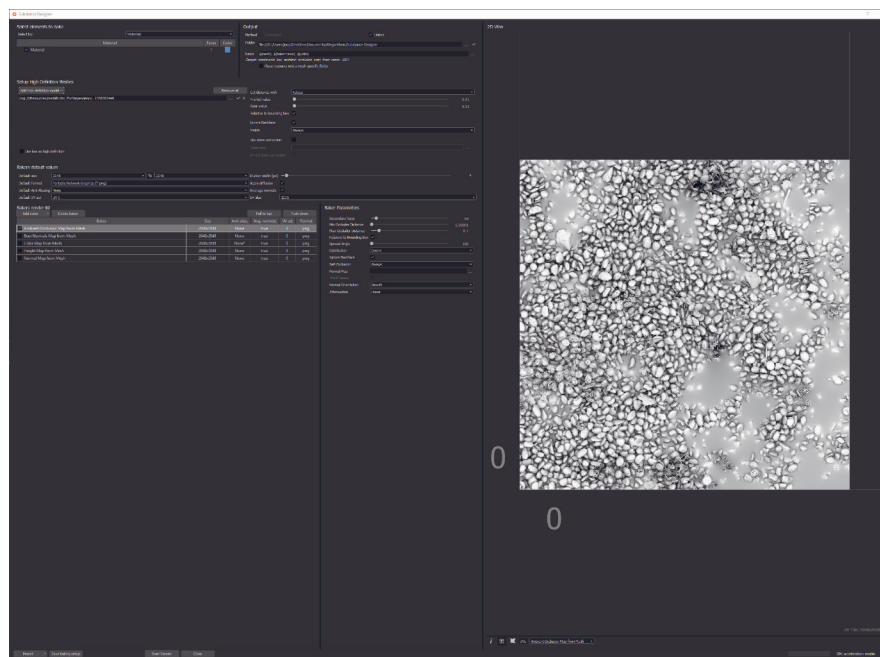
*Slika 46. Generirana geometrija highpoly modela,
autorov rad*



*Slika 47. Pozicioniranje highpoly i lowpoly modela,
autorov rad*

Kako bi se stvorile potrebne teksture koje će opisivati materijal, a da ostanu bazirane na originalnim snimkama, potrebno je *highpoly* model prevesti u *lowpoly* model, odnosno plohu. Prenosjenje takvih informacija se naziva procesom *baking textures*, te se može raditi u više različitih računalnih programa. U ovom slučaju će se ovaj proces odvijati u Substance Designer programu za izradu materijala. Modeli se unose u program, te se pokreće proces zapisivanja informacija na *lowpoly* model plohe.

Baking textures proces zahtjeva dva tipa geometrije, jedan sa koje se informacije uzimaju, te jedan na koji se informacije zapisuju. U velikoj većini slučajeva se uzima *highpoly* model kao izvor informacija, a *lowpoly* model kao model na koji će se zapisati sve informacije. Informacije koje su potrebne kako bi se materijal adekvatno reproducirao su *base color* (albedo), *height*, *normal*, *bent normal* i *ambient occlusion* informacije. Metodom praćenja zraka će algoritam u programu povezati *highpoly* model sa *lowpoly* modelom, te će informacije zapisati na njegovu UV mapu. Kako krajnji rezultat ovoga procesa se stvara set od pet slikovnih zapisa koji sadrže različite tipove informacija. Odabrani su upravo ti tipovi informacije jer se pomoću njih u daljnjim koracima mogu stvoriti ostale potrebne mape koje će biti zasnovane na realnoj reprezentaciji objekta. [33]



Slika 48. Baking ambient occlusion texture sa highpoly modela, autorov rad

Nakon što su dobivene teksture zapisane na disk je potrebno napraviti još jedan niz korekcija kako bi se materijal mogao koristiti u produkciji. Kao i u prijašnjim slučajevi-

ma, snimanjem fotografija dolazi do problema sa ponavljanjem fotografija gdje se jasno mogu vidjeti krajevi fotografija. Kako bi se korigirale takve neželjene pojave dobivene teksture se moraju dodatno obraditi. Slikovni zapisi se mogu obrađivati u programima poput Photoshop-a, ali kako je riječ o više povezanih slikovnih zapisa koji se moraju korigirati istovremeno na jednaki način, potrebno ih je obraditi zajedno. Programi poput Substance Painter-a omogućavaju takav rad jer su upravo zamišljeni sa idejom izrade materijala putem različitog seta tekstura koji ga opisuju. Unutar takvog programa se zapravo radi u trodimenzionalnom prostoru, a u programskoj pozadini se rade korekcije na setovima 2D slikovnih zapisa u obliku različitih tekstura.

U program se unosi *lowpoly* model plohe na koje su zapisane sve informacije, te se unose sve dobivene teksture. Gledajući teksture kada zauzimaju dani UV prostor izgledaju adekvatno, ali kada se UV počne ponavljati (kada se teksture smanje u veličini) može se vidjeti efekt koji se dobiva prilikom ponavljanja. Kako bi se riješio ovaj problem potrebno je pomaknuti teksture za pola u svim smjerovima kako bi se dobili svi rubovi tekstura. [32]



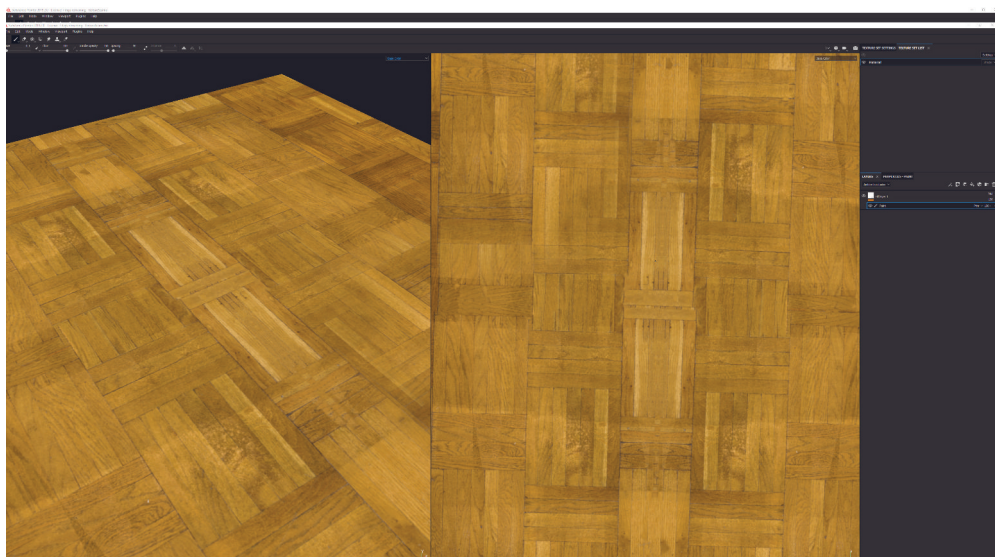
Slika 49. Translatirani UV prostor kako bi se vidjele linije fotografija, autorov rad

Sa tako postavljenim radnim dokumentom se može stvoriti poseban sloj u kojemu će se te informacije popraviti korištenjem alata poput *clone* i *stamp tool*-a koji su analogni svojim funkcijama kao u programima poput Photoshop-a. Nastavak rada je relativno jednostavan, gdje se pokušavaju prenijeti informacije iz drugih dijelova teksture na rubne dijelove kako bi se uklonilo očigledno iscrtavanje rubova tekstura. Iako se promjene

naizgled rade na samo jednom setu tekstura, promjene se propagiraju na sve ostale teksture, te je tako cijeli set tekstura ostao sinkroniziran. Može se primijetiti kako je ovakav pristup jednostavan kada je riječ o organskim oblicima poput nasumičnog kamenja ili listova trave. Kompleksniji problemi nastaju kada se radi o površinama sa jasno označenim oblicima koji se ponavljaju, kao u slučaju materijala parketa. [33] U tim slučajevima se mora obratiti više pažnje prilikom prenošenja informacija sa jednog dijela teksture na drugi ili se može kombinirati više različitih alata za manipulaciju slikovnih zapisa kako bi se napravio adekvatan krajnji rezultat.



*Slika 50. Popravak rubova fotografija kloniranjem,
autorov rad*



*Slika 51. Primjer materijala s prepoznatljivim uzorkom,
autorov rad*

Nakon što su rubovi tekstura popravljani, te se više ne može jasno vidjeti rub tekstura, ponovno se zapisuju na disk, te predstavljaju novi set tekstura za izradu krajnjeg materijala. Sve teksture osim *height* teksture su adekvatno napravljene na ovaj način. *Height* teksturu je vrlo teško napraviti adekvatno ovakvim manualnim putem. Iz toga razloga se zapisala informacija o *bent normals* jer će se pomoću nje i ostalih tekstura generirati nova *height* tekstura koja će biti kvalitetnija, te će se moći adekvatno ponavljati. [33]

Korigirane teksture se potom unose u Substance Designer u kojemu će se dalje korigirati kako bi se dobio krajnji materijal. U novom grafu materijala se povezuju početne teksture, te se pomoću niza funkcija prevode u konačni materijal i stvaraju se nove informacije poput *height* teksture. Prije uporabe osnovnih tekstura, mogu se povezati sa funkcijom *Make it tile photo* kako bi se daljnje ostvario efekt ponavljanja. Pomoću te jednostavne funkcije se može ostvariti vrlo visoka kvaliteta ponavljanja već korigiranih tekstura, te se takve koriste za daljnje obrade.

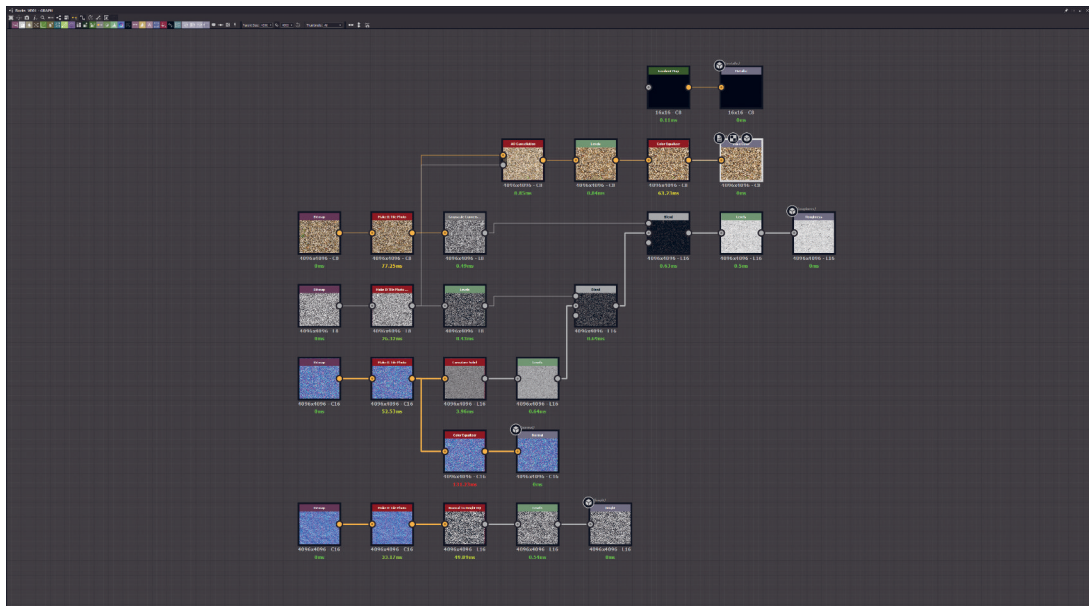
Albedo tekstura se jednostavno korigira tako da se iz nje oduzme informacija iz *ambient occlusion* teksture time dobivajući teksturu koja je gotova u potpunosti lišena informacija o svjetlosti i sjena time dobivajući gotovo savršenu albedo teksturu. Sama tekstura se dalje može korigirati klasičnim funkcijama za korekciju boje ili funkcijama poput *Color Equalizer* kako bi se smanjile najviše i najniže vrijednosti unutar same teksture. [33]

Može se primijetiti kako se do sada nigdje nije zapisivala *roughness* tekstura. Jedan od razloga je što ne postoji lako dostupni način da se ona automatski napravi prilikom procesa snimanja materijala ili prilikom procesa zapisivanja informacija. Iz toga razloga se onda naknadno stvara, te se evaluira vizualnom metodom. Kombiniranjem više tekstura, albedo, *ambient occlusion* i *normal*, pomoću različitih funkcija se u konačnici može stvoriti *roughness* tekstura koja je bazirana na realnim uvjetima. [33] Prilikom krajnje upotrebe materijala se uvijek može dalje korigirati *roughness* tekstura kako bi zadovoljila uvjete dane scene prilikom iscrtavanja.

Normal tekstura se više manje koristi kakva je, odnosno nema potrebe za njezinim daljnjim korekcijama. Poželjno ju je obraditi funkcijom *Color Equalizer* kako bi se korigirale najviše i najniže vrijednosti teksture. [33]

Height tekstura se može stvoriti pomoću konverzije teksture *bent normal*, te spajanjem sa osnovnom *height* teksturom koja je nastala nakon procesa zapisivanja informacija sa modela. U svom najjednostavnijem obliku je dovoljno *bent normal* teksturu putem funkcije *Normal to height HQ* konvertirati u crno-bijeli zapis, te putem korigiranjem ulaznih i izlaznih vrijednosti stvoriti *height* teksturu. [33]

Metalness tekstura je jednostavna crna tekstura s obzirom da je riječ o materijalu koji nije metalan, odnosno riječ je o dielektriku.



*Slika 52. Graf materijala,
autorov rad*



*Slika 53. Završni izgled materijala,
autorov rad*

Spajanjem svih korigiranih informacija tekstura sa odgovarajućim izlaznim parametrima se izrada materijala može smatrati dovršenom. Konačni materijal je baziran na re-

alnim vrijednostima, te zadovoljava sve uvjete fizikalno baziranog iscrtavanja. Također je moguće ponavljati materijal bez problema sa rubovima samih tekstura. Kao i u prijašnjim slučajevima, materijal se može dalje obogatiti spajanjem sa drugim materijalima ili dodavanjem proceduralnih efekata poput prljavštine i ostalih efekata. Kako bi se materijal mogao koristiti u drugim aplikacijama potrebno je teksture zapisati na disk u odgovarajućem formatu ili ga zapisati u Substance formatu kako bi se koristio direktno u aplikacijama koje podržavaju Substance format zapisa.

3.4. Materijal izrađen proceduralnim funkcijama

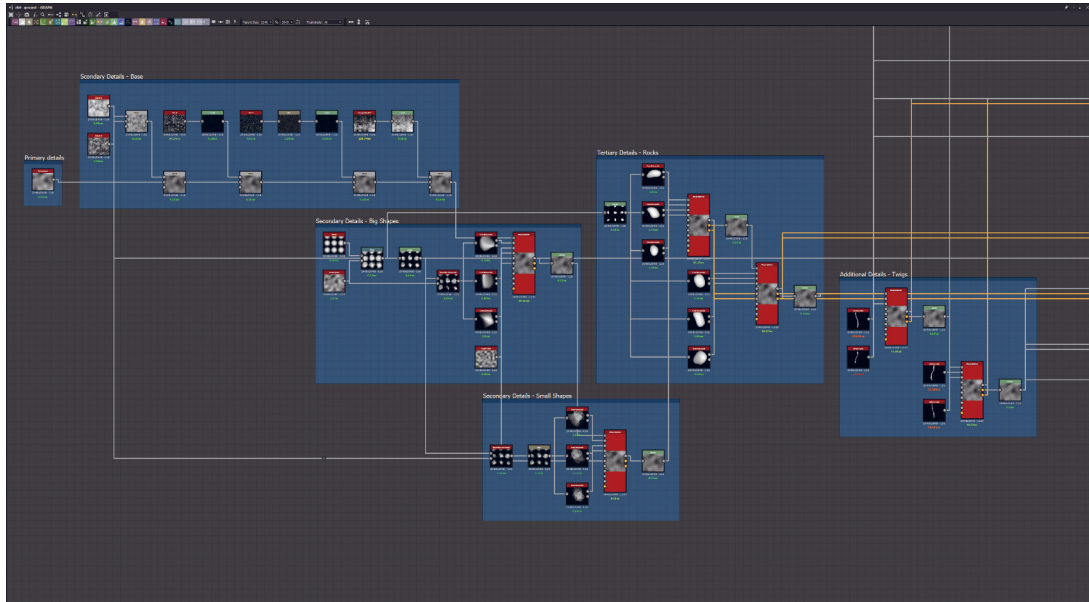
Materijal izrađen proceduralnim funkcijama je posebice popularan razvojem programa poput Substance Designer-a koji omogućuju tehničkim umjetnicima iznimnu slobodu prilikom kreiranja materijala. Ovakav tip materijala je u većini slučajeva u potpunosti proceduralan te se kao takav vrlo često koristi prilikom pravovremenog iscrtavanja. U ovome primjeru će biti okvirno prikazan princip rada sa različitim funkcijama kako bi se ostvario takav materijal.

Glavna premisa rada prilikom kreacije proceduralnih materijala je apstraktno razmišljanje o samim oblicima koji će sačinjavati takav materijal. Kako je riječ o manipulaciji velikog broja crno-bijelih *noise* funkcija i različitih apstraktnih maski, potrebno je sagledati cijeli proces putem više slojeva detalja. [54] Kao i kod klasične umjetnosti gdje umjetnik kreće od jednostavnih oblika, te postepeno razrađuje određene detalje ovisno o njihovoj funkciji u samome radu.

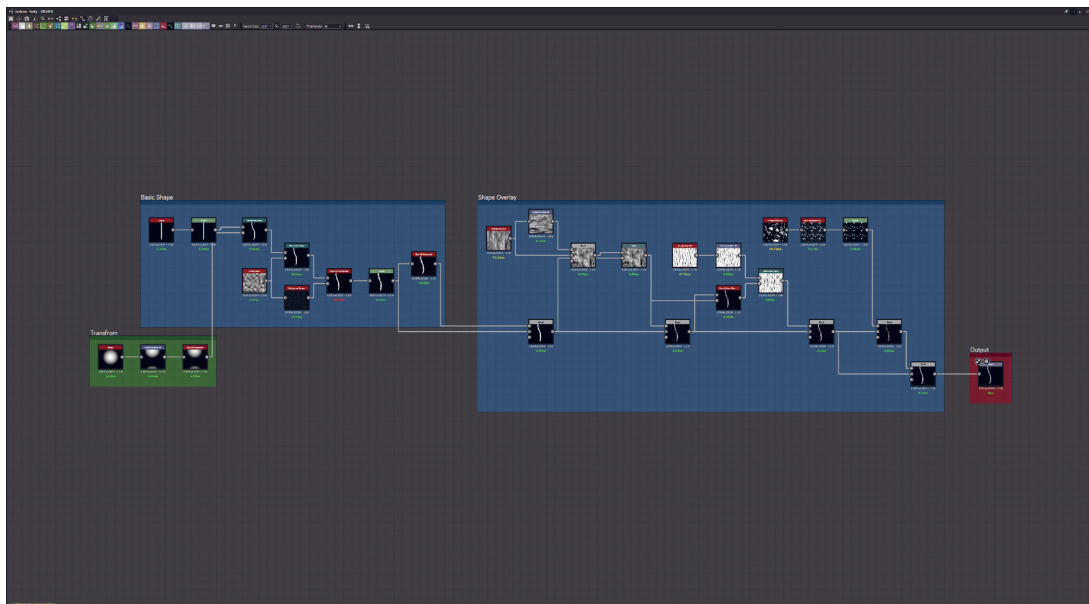
Radi optimizacije rada, prvo se radi sa različitim funkcijama koje će stvoriti oblike, u obliku crno-bijelih zapisa. Nakon što je sama forma budućeg materijala zadovoljena se radi sa bojom i izradama konačnih tekstura koje će tvoriti materijal. Razlog tome je što se za računanje crno-bijelih slikovnih zapisa koristi puno manje računalne snage, a s obzirom kako se svaka funkcija nastavlja na sljedeću, te tako do kraja lanca koji tvori materijala, pravilo propagiranje informacija može imati veliki utjecaj na performanse i kvalitetu rada. To je posebice očituje kada se materijal u obliku grafa čita u drugim aplikacijama prilikom njihova poziva za iscrtavanjem. [54]

U ovome slučaju radi se o materijala koji će predstavljati zemljani teren prekriven kamenčićima, granama i prljavštinom. Proces rada se sastoji od kreacije osnovnog oblika terena putem crno-bijele mape koja se može apstrahirati kao teren određenog brda ili zemlje. Na taj način se dobiva osnovna za daljnji rad sa oblicima. Sljedeći korak je dodavanja sekundarnih i tercijarnih detalja, što terena što kamenja. Ovo se također postiže

manipulacijom crno-bijelih *noise* funkcija pomoću kojih se stvaraju oblici poput kamenja ili dodatni detalji na reljefu terena. Prilikom izrade ovakvih oblika, koji bi trebali reprezentirati elemente pravog svijeta, potrebno je razmišljati o skali same teksture. [54]



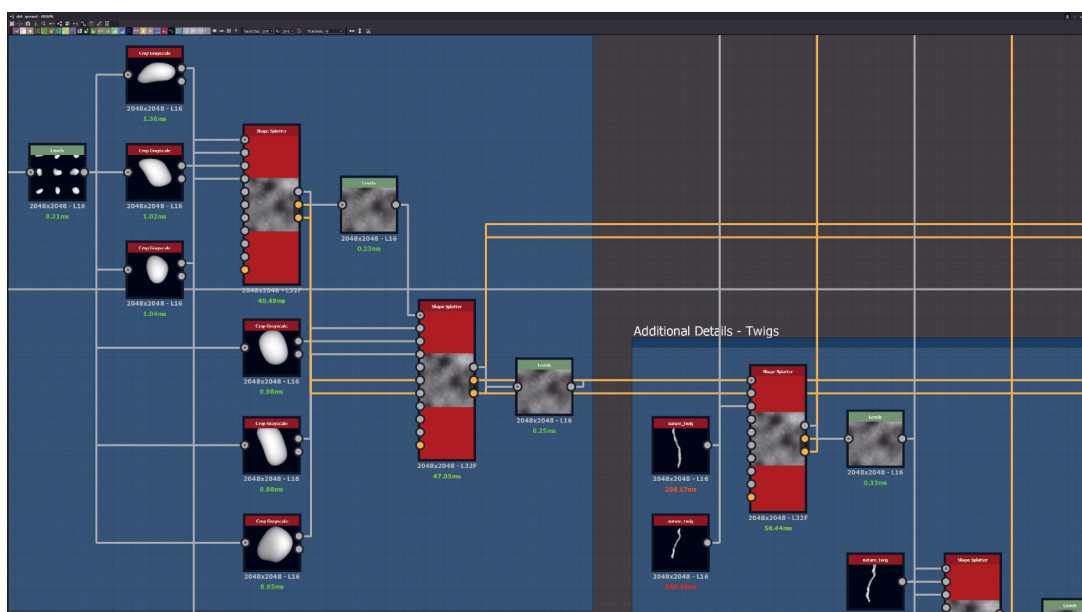
*Slika 53. Osnovni oblici crno-bijelih noise funkcija,
autorov rad*



*Slika 54. Graf jednostavne proceduralne grane,
autorov rad*

Kako bi se optimizirao i sami graf u kojemu se radi, određeni detalji poput grana koje će pokrivati teren se mogu napraviti u novom grafu. Na taj način se proceduralne grane mogu koristiti i u drugim projektima. Kao i kod izrade kamenja, grane se izrađuju manipulacijom različitih crno-bijelih funkcija. Ponovno, radeći sa apstraktnim oblikom koji asocira svojim izgledom na granu. Prilikom rada sa takvih objektima, dobro je imati reference pravih objekata kako bi se sami oblici mogli reducirati na siluetu. Nakon što su grane zadovoljavajućeg oblika, mogu se povezati sa glavnim grafom koji će postati krajnjim materijalom. Prednost proceduralnog načina rada je što ukoliko dođe do promjena oblika grana, jednostavno se mogu korigirati unutar vlastitog grafa, a produkt će se propagirati unutar glavnog grafa. [54]

Promatrajući graf do sada može se primijetiti kako su od svih oblika uzeti po dva ili tri varijacije. Razlog tome je da se nasumično razvrsta što je veća moguća mjera različitih manjih detalja. Na taj način se postiže efekt realnog materijala koji je u prirodi nesavršen, te da se ne primijeti ponavljanje samih elemenata. [54]



Slika 55. Detalj grafa u kojemu se rade varijacije detalja, autorov rad

Nakon što su bazični oblici zadovoljni željenu formu, nastavak rada se odnosi na kreaciju završnih tekstura, te koloraciju elemenata koji sačinjavaju zadani materijal. Kako kamenje, granje i zemlja nisu jednake boje, tako se posebno svaki od elemenata kolorirati. Rastavljanjem većih elementa na manje skupine, mogu se dodatno različito kolorirati velike i male grane, te kamenje time dobivajući još veću raznolikost prilikom

The screenshot displays the Blender 2.79 software interface. At the top, the Outliner panel shows a collection named "Collection" containing objects like "Cube", "Image", "Material", and "Texture". The Properties panel on the right shows the "Material" properties for the selected object, including "Base Material" and "Layer". The main 3D Viewport shows a cube with a material applied. The material's node editor is visible, featuring a "Base Material" node connected to a "Layer" node. The "Layer" node contains a "Mix Color" node, a "Mix Shader" node, and two "Image Texture" nodes. The final output is visualized as a vertical strip of eight small preview images on the right side of the screen, each representing a different material configuration or texture combination. These images are labeled with names like "Base Material", "Layer", "Image", "Material", and "Texture".

59



*Slika 58. Varijacija konačnog materijala,
autorov rad*

Od postojećih funkcija se različitim konverzijama mogu stvoriti ostale potrebne teksture za opisivanje materijala. Kako je opisano u prethodnim primjerima, postoje određene funkcije koje se mogu konvertirati jedne u drugu, te jednostavnim korekcijama ulaznih i izlaznih parametara ostvariti željeni rezultati. Na taj način su se stvorile ostale potrebne teksture za opisivanje materijala. [54]

Iako se materijal u ovome trenutku može smatrati gotovi, još je spojen sa posebnom funkcijom *Water level* kako bi se dobio dojam da su određeni dijelovi materijala pod vodom. Ovo samo pokazuje kako se osnovni materijal uz posebne maske ili maske nastale

iz samog materijala može kombinirati s različitim materijalima kako bi se ostvarila daljnja iteracija materijala. Kao konačni produkt se dobivene teksture mogu zapisati kao slikovni zapisi za korištenje u različitim aplikacijama ili se mogu zapisati kao grafovi za korištenje u određenim programima kako je prije spomenuto. [54]

Ovdje je naveden samo mali segment izrade proceduralnih materijala pomoću matematičkih funkcija, ali se može uočiti široka paleta mogućnosti prilikom izrade različitih tipova materijala za obje vrste iscrtavanja.

4. REZULTATI I RASPRAVA

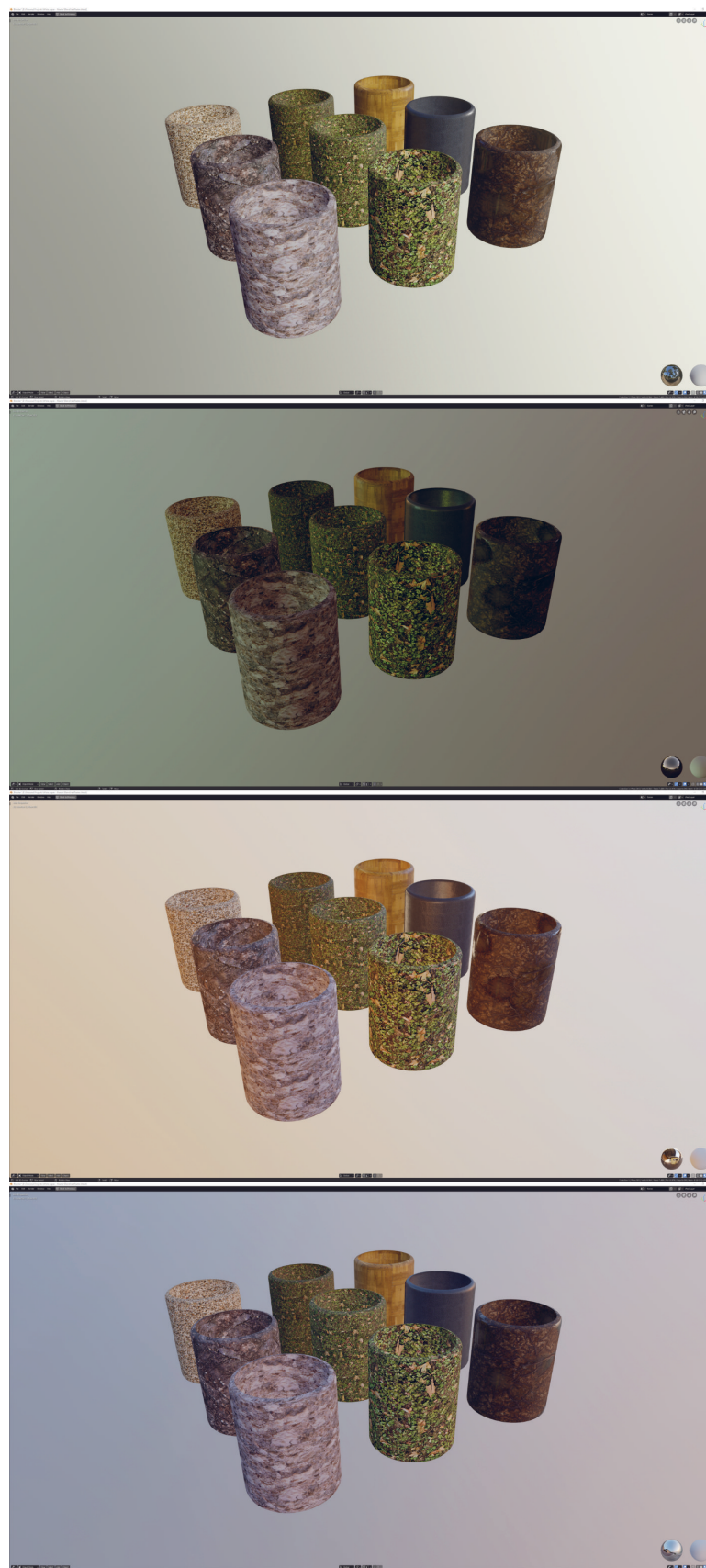
Kreirani materijali se sada mogu koristiti u različitim aplikacijama, od programa za manipulaciju geometrije i iscrtavanja do programa za pravovremeno iscrtavanje. Osnovna stavka materijala koja se mora provjeriti je da li rezultiraju adekvatnim vizualima u različitim uvjetima osvjetljenja. Adekvatno ponašanje u različitim uvjetima osvjetljenja je jedna od glavnih pretpostavki fizikalno baziranog sustava iz razloga objašnjenih u teorijskom dijelu rada. S obzirom na način izrade samih materijala, svi napravljeni materijali bi trebali odgovarati ovome zahtjevu. Promatrajući izrađene materijale pod različitim uvjetima osvjetljenja bi se moglo zaključiti da se adekvatno ponašaju u svim uvjetima. Jedino se kod primjera materijala kamena može reći da odstupa od realnih vrijednosti. Promatrajući taj materijal se može vidjeti kako su mu neadekvatne albedo teksture. Ukoliko se pojavi takav primjer prilikom izrade materijala, tada je potrebno vratiti se na proces obrade samih fotografija i pokušati korigirati problematične teksture.

Također treba imati u vidu da različite aplikacije drugačije interpretiraju iste informacije. Promatrajući problematični materijal u različitim aplikacijama mogu se primijetiti suptilne razlike. Razlog se može pronaći u načinu kako određene aplikacije tretiraju fizikalno bazirano iscrtavanje i materijale.

Iako su svi materijali izgledali adekvatno prilikom izrade, pregledavajući u aplikacijama u kojima su rađeni, pravilno ocjenjivanje materijala se može odraditi tek kada ih se stavi u određeni kontekst u aplikaciji u kojoj će se koristiti. Kada se pronađe zahtjev generiranih materijala, jednostavno ih je naknadno korigirati kako bi u što većoj mjeri odgovarali zadanoj aplikaciji ili određenom zahtjevu iscrtavanja.

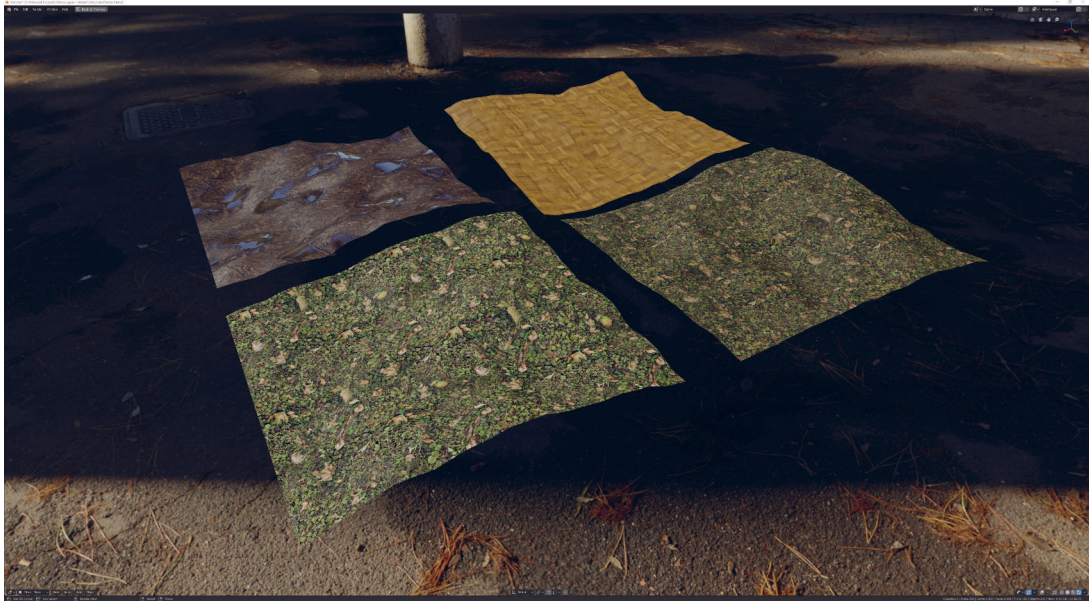
Nakon što su materijali evaluirani u zadanoj aplikaciji, u ovome slučaju u nativnim aplikacijama u kojima su rađeni, te Blender-u, mogu se koristiti u potrebitim situacijama. U ovome slučaju su napravljene testne scene kako bi se testirao izgled samoga materijala i provjerile potencijalne limitacije određenih pristupa izradi materijala. Scena je sastavljena od jednostavne geometrije na kojoj se ponavljaju materijali tako da se na ovaj način također može provjeriti mogućnost ponavljanja samih materijala. Scena se iscrtava u pravom vremenu pomoću novog sustava iscrtavanja Eevee u Blender-u 2.80. [55]

Pregledavajući materijale u testnoj sceni se mogu donijeti određeni zaključci. Izrađeni materijali se trebaju sagledati i evaluirati sa više strana, od njihove kvalitete prilikom iscrtavanja, ali također sa ekonomske strane vremena uloženog u izradu samih materijala. U tome trenutku dolazi do rasprave u kojim se sve slučajevima koriste napravljeni mate-

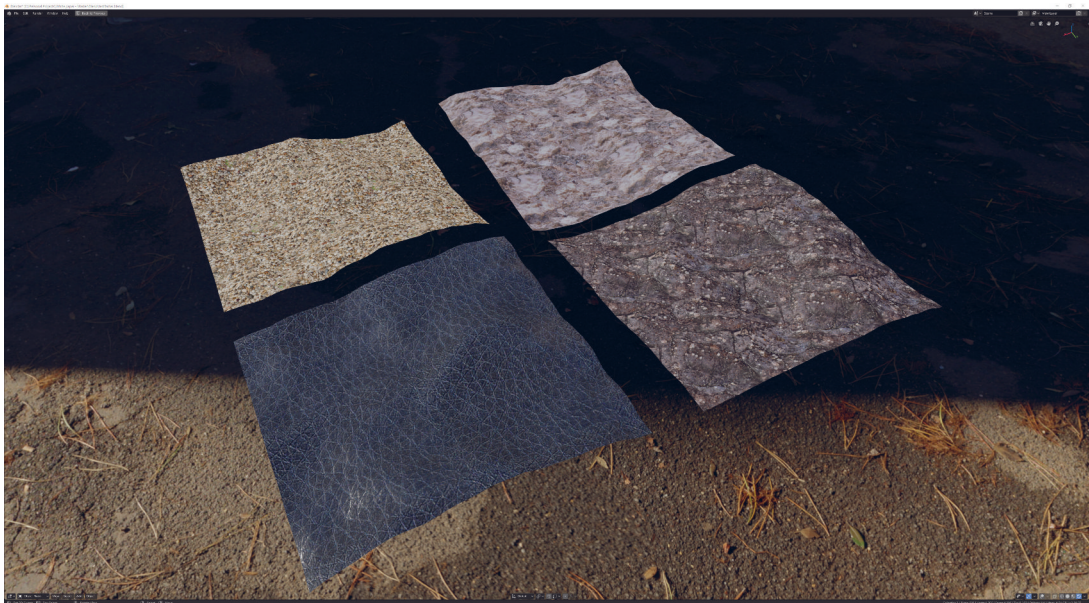


Slika 59. Različiti tipovi osvjetljenja i utjecaj svjetlosti na materijale, autorov rad

rijali, jer kako je spomenuto u teorijskom djelu, postoje jasne razlike između glavnih objekata scene, sekundarnih i tercijarnih.



Slika 60. Ponavljanje fotogrametrijskih i proceduralnih materijala, autorov rad



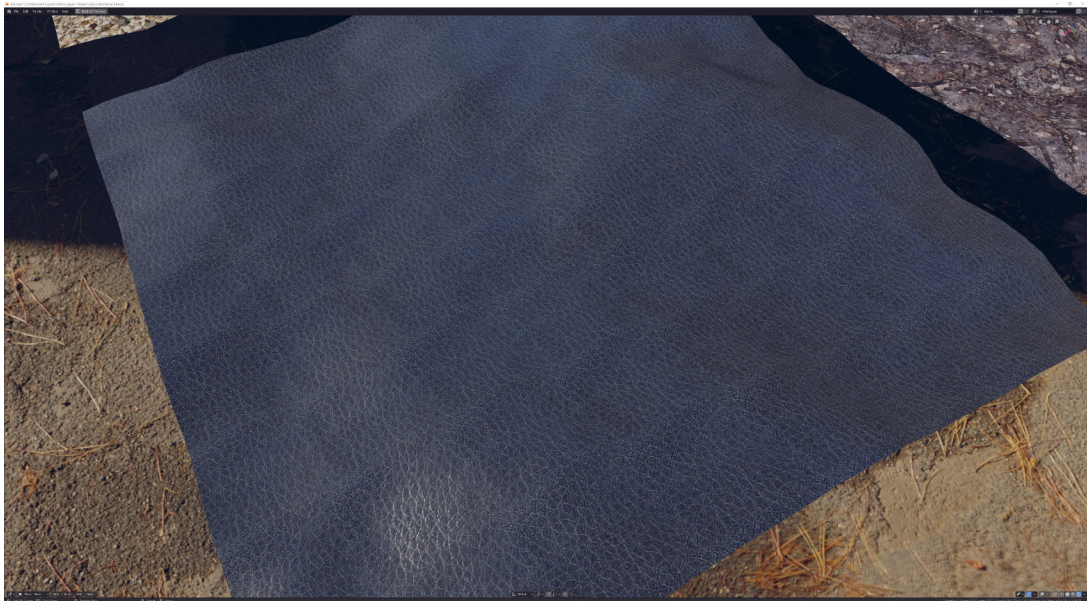
Slika 61. Ponavljanje fotogrametrijskog i višekutnog materijala, te iz jedne fotografije, autorov rad

U ovome primjeru su izrađeni materijali većih površina poput kamenja, parketa, travnatih površina, te se može zaključiti da se takvi materijali koriste za izradu velikih okoliša

u koji se smještaju različiti drugi objekti. U tome trenutku, glavna zadaća takvih materijala je da se mogu pravilno ponavljati bez jasno vidljivih linija ponavljanja ili određenih uzoraka ponavljanja. Promatrajući tako napravljene materijale može se primijetiti korelacija između načina izrade materijala i njihove mogućnosti efektivnog ponavljanja.

Materijali nastali metodom izrade materijala pomoću tehnike fotogrametrijskog snimanja pokazuju kvalitetnije ponavljanje na velikim površinama u odnosu na druge materijale izrađene ostalim metodama. Jedan od glavnih razloga takvog ponašanje materijala proizlazi iz jednostavnog broja samih fotografija i informacija koje ga sačinjavaju. Kako se prilikom izrade materijala tehnikom fotogrametrije uzima veliki broj fotografija za opisivanje materijala, tako se moglo pohraniti puno više informacija o njegovoj definiciji. Na taj način se materijal može ispravno ponavljati veći broj puta, da i dalje zadržava vizualno prihvatljivi oblik. Materijali nastali proceduralnim procesom rada i materijali iz više kutnih fotografija također pokazuju dobro svojstvo ponavljanja.

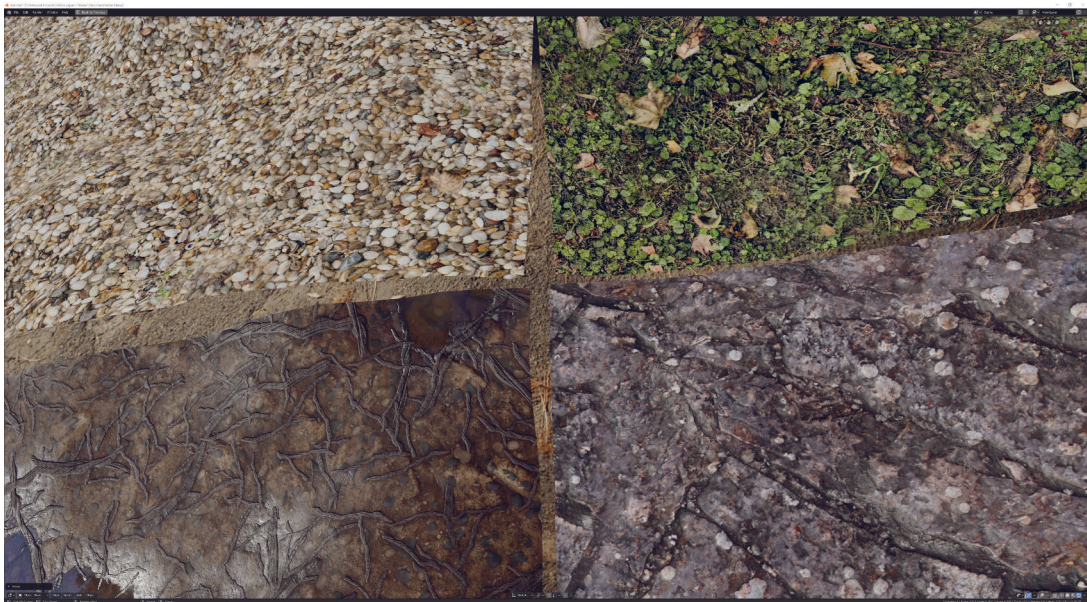
Materijal nastao iz višekutnih fotografija pokazuje određene grafičke probleme prilikom ponavljanja, gdje se mogu vidjeti obrađeni rubovi fotografija korištenih u izradi. Ovakav problem se može riješiti boljom korekcijom materijala prilikom same obrade. Materijal nastao proceduralnim funkcijama nema problema sa ponavljanjima, te nema problema sa rubovima samih materijala s obzirom na prirodu samog načina izrade.



*Slika 62. Linije ponavljanja materijala,
autorov rad*

U ovome slučaju se niti jedna metoda izrade ne bi smjela odbaciti ili reći koja je kvalitetnije ili adekvatnija, jer veliki utjecaj na percepciju također ima i sami snimani materijal. Jedan od materijala sniman procesom iz jedne fotografije pokazuje bolja svojstva ponavljanja od drugog što upućuje na samu prirodu snimanog objekta. Sa time u vidu, i dalje se može zaključiti da su po pitanju ponavljanja kvalitetniji materijali nastali iz većeg broja fotografija, bili višekutne metode ili fotogrametrijske metode, te proceduralni materijali koji po prirodi imaju najmanje šanse pokazivati relevantne probleme.

S obzirom da su materijali zamišljeni kao elementi okoliša, rezolucija je također na visokoj razini prioriteta materijala. Kada se govori o rezoluciji materijala, nije toliko riječ o samoj kvaliteti albedo tekstura, već svih ostalih tekstura koje u okolišu čine veliku razliku između dobrih i loših perceptivnih svojstva, pritom misleći na *roughness* i *normal* texture. Za takve materijale je vrlo važno da imaju raznoliku interakciju sa svjetlosti kako bi stvorili realniji doživljaj prilikom krajnjeg iscrtavanja.

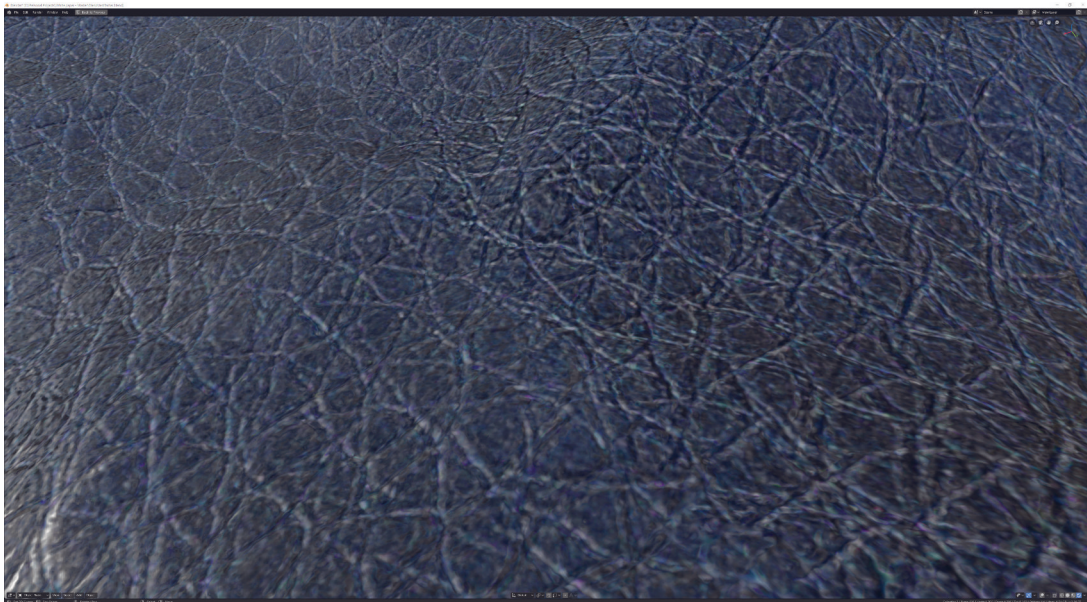


*Slika 63. Razlika u rezoluciji materijala,
autorov rad*

Po pitanju rezolucije, najkvalitetniji materijal je onaj izrađen proceduralnim tehnikama rada. Razlog tome je ponovno jednostavan, jer se vraća na prirodu proceduralnih materijala koja im omogućuje gotovo beskrajno povećanje ili smanjenje rezolucije bez gubitka na detaljima, oštirini ili ostalim aspektima koji čine jedan materijal. Sljedeći materijali pokazuju očekivani kvalitetu po pitanju oštirine i rezolucije informacija. Materijali nastali procesom fotogrametrijskog snimanja i izrade također pokazuju veliku

količinu informacija pri istom broju ponavljanja tekstura. To je očekivani ishod ukoliko se promatra sami izvor informacija. Kako je sniman veliki broj fotografija koji je sažet u jednu teksturu, iako iste krajnje rezolucije kao i ostali materijali i texture, sadržava veću količinu informacija i sadržaja.

Materijal nastao iz višekutnih fotografija je poseban slučaj. O njemu će biti više govora u nastavku radu jer se problemi očitovani u ovakvom materijali mogu najviše pripisati tehničkom djelu izrade materijala. Materijal nastao iz jedne fotografije je gotovo jednake rezolucije i količine informacija kao i početna fotografija. Nedostatak ovakvoga rada je povezan s izvorom informacija gdje se radi o jednom izvoru informacija, te prilikom obrade samog materijala da ostvari određene zahtjeve, dolazi do degradacije određenog broja informacija. Na drugu stranu, materijal nastao ovim putem također bi se mogao smatrati adekvatnim za tercijarne površine koje bi se promatrale s veće udaljenosti jer ne pokazuje ostale veće grafičke artefakte.



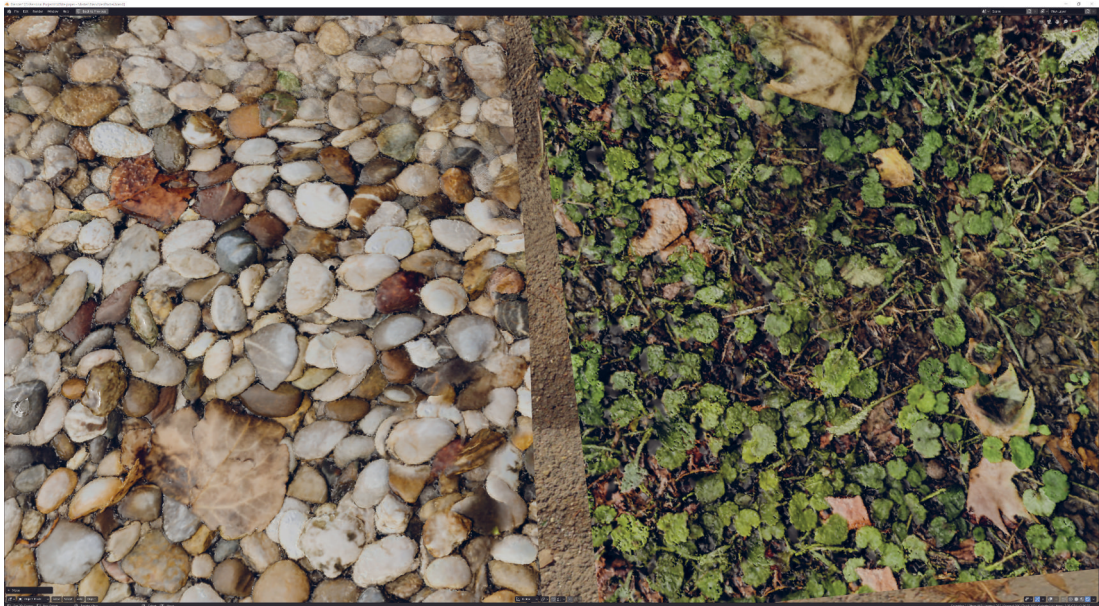
Slika 64. Grafički artefakti nastali snimanjem višekutnog materijala, autorov rad

Promatrajući materijale iz velike blizine mogu se primijetiti određene limitacije povezane sa samim procesom snimanja materijala. Ovaj aspekt se najviše očituje na materijalu nastalom iz višekutne fotografije. Promatrajući materijal iz velike blizine se može primijetiti nepravilno poklapanje samih fotografija od kojih je materijal napravljen. Razlog tome je način na koji je sniman materijal. Kako se snimanje odvijalo sa kamerom koja se nalazi na pametnom telefonu, nije bilo moguće ga pravilno stabilizirati bez korištenja posebnih

dodataka. Snimanim fotografijama iz ruke je došlo do pomaka koji se dalje propagirao na materijal u procesu spajanja fotografija. Također, kako je sniman fizički mali uzorak materijala, u ovome slučaju 8 x 8 centimetara materijal, sama kamera je imala problema sa fokusom materijala ukoliko je bila preblizu istoga. Iz toga razloga se morao raditi kompromis prilikom snimanja, te je sami materijal zauzimao relativno malo prostora na samoj fotografiji. Kako se dalje materijal obrađivao, količina informacija se dodatno smanjila, te se može reći da je od početne rezolucije materijal smanjen najmanje dva puta. Iz toga razloga se na ovome materijalu može vidjeti najviše nepoželjnih grafičkih artefakata.

S obzirom da je riječ o maloj površini materijala, jedan od načina da se mitigira ovaj problem je povećanje broja ponavljanja tekture. Na taj način se smanji mogućnost prepoznavanja grafičkih artefakata, te materijal izgleda adekvatno prilikom iscrtavanja.

Na drugim materijalima se mogu također primijetiti manji grafički artefakti nastali korištenjem mobilne kamere kao izvorom fotografija. Kako je riječ o vrlo malom senzoru koji se nalazi u mobilnoj kameri, dolazi do pojavljivanja velike količine šuma pri većim povećanjima fotografija. Iako teško prepoznatljiv artefakt u samoj fotografiji, on se jasno propagira u nastavku izrade materijala, posebice prilikom rada sa fotogrametrijskim snimanjem materijala. U procesu generiranja *highpoly* modela iz fotografija se može primijetiti najveća količina šuma koji se reprezentira u samoj geometriji. S obzirom da je materijal sastavljen od velikog broja fotografija, takav šum se može zanemariti, te na krajnje korištenje materijala. Unatoč tome, važno je primijetiti ovakve limitacije samog procesa snimanja.



*Slika 65. Grafički artefakti nastali šumom u highpoly modelu,
autorov rad*

Najznačajnije greške nastale upravo zbog šuma na fotografijama se može očitati na materijalu parketa. U procesu snimanja materijala su nastala mjesta veće količine šuma koji se propagirao kroz cijeli proces izrade materijala, te se može jasno očitati prilikom promatranja materijala iz veće blizine. Prilikom izrade materijala takav šum se preveo u *roughness* teksturu koja značajno utječe na percepciju materijala prilikom određenih kutova svjetlosti. Ovakav problem se može djelomično ukloniti u samom procesu izrade, gdje se izvorne fotografije moraju dodatno obraditi, te se ukloniti dio šuma koji je nastao.



*Slika 66. Artefakti propagiranu u više tekstura,
autorov rad*

Jedan od problema koji je nastao tijekom snimanja, a nije imao značajnog utjecaja u zadanim primjerima nastalih materijala je efekt vinjetiranja. Iako moderni alati za obradu fotografija imaju vrlo dobre algoritme za rješavanje toga efekta, potrebno ga je primijetiti kao dio prirode snimanja sa mobilnim kamerama.

Sa obrađenim tehničkim aspektom nastalih materijala treba sagledati rezultate s obzirom na alocirano vrijeme za samu izradu materijala. Ovaj aspekt izrade materijala uključuje zadanu premisu snimanja materijala sa mobilnom kamerom, odnosno sa vrlo dostupnim uređajem, te bez korištenja dodatne profesionalne opreme, na stranu X-Rite ColorChecker-a. Kako je riječ o nekvalitetnoj kameri u odnosu na profesionalne fotoaparate koji imaju rezolucije do 50MP, te velike senzore koji su u mogućnosti snimati bez šuma, treba korigirati očekivanja o kvaliteti krajnjih rezultata.

Promatrajući izrađene materijale, može se zaključiti kako je njihova kvaliteta adekvatna ili dovoljno adekvatna za određene slučajeve korištenja. Razlika u generiranim materijalima se očigledno nalazi u procesu njihove izrade. Najduži proces izrade materijala uključuje fotogrametrijska metoda izrade materijala, te uključuje najveći broj potrebnih računalnih aplikacija kako bi se ostvario konačni rezultat gdje treba uračunati cijenu licenci za korištenje samih programa. Iako se sami rezultat može smatrati najkvalitetnijim od ostalih materijala nastalih iz fotografskih snimaka dovodi se njegova ekonomičnost u pitanje. Proces rada u kombinaciji sa amaterskim uređajima poput mobilne kamere je definitivno validan, ali sami krajnji rezultat možda ne opravdava količinu rada ili cijenu licenci. Ovaj pristup bi svoj puni potencijal pokazao, te pokazuje, prilikom korištenja profesionalne kamere gdje se mogu ostvariti materijali iznimne kvalitete, rezolucije, te količine detalja.

Proces izrade materijala iz višekutne fotografije pokazuje vrlo vrijedan alat za izradu materijala prema uzorku samog materijala. Proces nije kompliciran, te ne zahtijeva veliku količinu računalnih programa za izradu krajnjeg materijala. Ukoliko se može riješiti problem stabilizacije kamere, krajnji materijali bi bili još veće kvalitete. Zadnji oblik izrade materijala se sastoji od izrade materijala pomoću jedne fotografije. Iako se naspram ostalih metoda, ovi materijali mogu smatrati najmanje kvalitete, brzina i jednostavnost izrade ovakvog materijala je bez premca. Osim što je potreban jedan računalni program za izradu materijala, te je proces snimanja materijala iznimno kratak, ovaj postupak bi se mogao smatra vrlo korisnim za izradu koncepata materijala ili za izradu materijala na tren i projektima koji imaju vrlo kratko vrijeme rada.

Izrada potpuno proceduralnog materijala je potpuno drugačija vrsta izrade materijala. Definitivno najkompliciranija metoda izrade materijala koja zahtijeva puno tehničkog i programski specifičnog znanja. Na drugu stranu, ova metoda omogućava izradu beskonačno mnogo materijala, baziranih na fizikalnim materijalima ili izradom izmišljenih materijala i njihovih kombinacija.

Promatrajući na taj način procese izrade materijala mogu se sagledati prednosti i mane svake tehnike. U svakom slučaju, svaka tehnika ima svoje mjesto, te razlog zašto bi se odabrala jedna tehnika nad drugom.

5. ZAKLJUČAK

Pregledom priloženih materijala i osvrtom na teoriju, te pozadinu izrade fizikalno baziranih materijala, može se reći da se radi o širokom području djelovanja. Cijeli proces izrade fizikalno baziranih materijala i manipulacija njima zahtjeva razumijevanje tehničkog aspekta rada, dok sa druge strane mora zadovoljavati grafičke ili umjetničke zahtjeve krajnje uporabe. Usprkos tome, zahvaljujući razvoju tehnologije, računalnih aplikacija i dostupnosti informacija putem internetski kanala, krajnji korisnik ima priliku testirati i isprobati rad sa različitim sustavima i protokolima rada.

U suštini ovakav rad sa fizikalno baziranim materijala i pravovremenim iscrtavanjem postaje sve češće u svakodnevnom radu u različitim industrijama. Riječ je o krajnjim vizualizacijama, digitalnom testiranju materijala ili produkt dizajna, te izradi video igara. Iz toga razloga poznavanje ovoga tipa načina rada je od iznimne važnosti za sve buduće digitalne umjetnike koji žele raditi u jednom od segmenata ove široke industrije.

Kako je u radu prikazan pristup izradi samih materijala na više načina, treba se osvrnuti na kvalitete poznavanja takvog tipa rada. Kako je riječ o alatima, poznavanje rada sa više alata omogućava odabir najefikasnijeg alata za izradu određenog posla ili savladavanja određene problematike. U tome kontekstu, izrada vlastitih fizikalno baziranih materijala predstavlja područje velikih mogućnosti za digitalne umjetnike. Određeni načini rada predstavljaju vrlo jednostavan proces izrade materijala s malom investicijom u kontekstu opreme ili računalnih aplikacija, što omogućuje izradu unikatnih materijala prema zahtjevima hipotetskog klijenta. Vrlo često se prilikom izrade vizualizacija za klijente radi o određenim adaptacijama postojećih prostora ili stvaranja scena usko baziranih na određenim vodećim točkama u smislu oblika, materijala i osvjetljenja. Ovim metodama se mogu izraditi egzaktni materijali snimanjem na terenu ili generiranjem velikog broja varijacija osnovnih zadanih materijala koje je klijent specificirao. Takvom prezentacijom rada se postiže profesionalan izgled pred klijentima, te se njihove potrebe zadovoljavaju bez velikih komplikacija ili troškova sa strane digitalnog umjetnika.

Nepisana prednost rada sa ovakvim tipom izrade materijala je mogućnost rada u industriji sa specijaliziranim zadatkom izrada materijala. Trenutačno vrlo popularan segment digitalne grafike je upravo izrada različitih tipova materijala, bilo baziranih na fotografskom snimanju materijala ili izradi proceduralno generiranih materijala.

Navedene prednosti i potencijalne mogućnosti poznavanja navedenog tipa rada obogaćuju digitalnog umjetnika sa osobne strane, gdje razvija puno veće vještine izrade vlas-

titih radova i scena. Također ga obogaćuje sa profesionalne strane gdje mu se otvaraju nove mogućnosti po pitanju zaposlenja i specijalizacije u daljnjim stadijima karijere.

Iako je trenutačno fizikalno bazirano sjenčanje i iscrtavanje standard u industriji, moglo bi se spekulirati da će se s vremenom standardi promijeniti. Takva pretpostavka je najvjerojatnije točna, jer se iznimno brzo mijenjaju tehnike rada u digitalno doba, te se standardi mijenjaju kroz godine. Unatoč tome, kako se može iščitati iz teorijskog dijela rada, sve tehnike su razvijene kao nastavak na postojeće tehnike rada. Upravo iz toga razloga je vrijedno poznavanje osnova razvoja kako bi se budući modeli rada mogli jednostavnije i brže razumjeti.

6. LITERATURA

1. Encyclopedia of Stone Age Art, Altamira Cave Paintings, [web-stranica]., <http://www.visual-arts-cork.com/prehistoric/altamira-cave-paintings.htm>, (posjećeno 10. srpnja 2019.).
2. Leonard, M., "The History of Computer Graphics and Effects", Sphere VFX, studeni 2016, <http://www.spherevfx.com/wp-content/uploads/2016/11/History-of-CG-and-FX-.pdf>, (posjećeno 10. srpnja 2019).
3. Pyfer, J., Encyclopedia Britannica, [web-stranica]., <https://www.britannica.com/technology/Sketchpad#ref1222780>, (posjećeno 10. srpnja 2019).
4. L. Hosch, W., Encyclopedia Britannica, [web-stranica]., <https://www.britannica.com/biography/Ivan-Edward-Sutherland>, (posjećeno 10. srpnja 2019).
5. IMDb, Star Wars: IV - A New Hope, [web-stranica]., https://www.imdb.com/title/tt0srpanj6759/awards?ref_=tt_awd, (posjećeno 10. srpnja 2019).
6. Kirps, J., Street Directory, The Very First Video Game Ever Released (and It's not Pong), [web-stranica]., https://www.streetdirectory.com/travel_guide/141178/gaming/the_very_first_video_game_ever_released_and_its_not_pong.html, (posjećeno 15. srpnja 2019).
7. Benno, R., Blog The Rookies, A Brief History of 3D Texturing in Video Games, [web-stranica]., <https://blog.therookies.co/2019/05/09/a-brief-history-of-3d-texturing-in-video-games/>, (posjećeno 15. srpanj 2019).
8. Salvi, A., Substance, Go Scan the World! Photogrammetry with a Smartphone, [web-stranica]., <https://www.substance3d.com/blog/go-scan-world-photogrammetry-smartphone>, (posjećeno 19. srpnja 2019).
9. Hughes, J. F., et al., Computer Graphics: Principles and practice, 3rd edn., Addison-Wesley Professional, 2013., str. 387. - 393., 547. - 549., 927. - 932.
10. Windows Dev Center, HLSL, [web-stranica]., <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/direct3dhls/dx-graphics-hlsl>, (posjećeno 28. kolovoza 2019).
11. Vivo, P. G. and Lowe, J., The Book of Shaders, [web-stranica]., <https://thebookofshaders.com/>, (posjećeno 23. srpnja 2019).
12. Wikipedia, Shader, [web-stranica]., <https://en.wikipedia.org/wiki/Shader>, (posjećeno 04. srpanj 2019).
13. Ahrem, L., 3D Game Textures: Create Professional Game Art Using Photoshop, 2nd edn., Oxford, Focal Press, 2009., str. 13. - 16., 94. - 129.

14. Russell, J., Basic theory of physically-based rendering, Marmoset LLC, [web-stranica], <https://marmoset.co/posts/basic-theory-of-physically-based-rendering/>, (posjećeno 23. srpnja 2019).
15. Marschner, S., and Shirley, P., Fundamentals of Computer Graphics, 4th edn., New York, CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, str. 233.-239., 243.-244., 246.-253.
16. R. Tunnel and J. Jago and M. Luik, Computer Graphics Learning Materials, <http://cglearn.eu/pub/computer-graphics>, (posjećeno 30. listopada 2018).
17. Burley, B., Physically-Based Shading at Disney, Walt Disney Animation Studios, 2012., dostupno: <https://pdfs.semanticscholar.org/eeee/3b125c09044d3e2f58ed0e4b1b66a677886d.pdf>, (posjećeno 23. srpnja 2019).
18. Allegorithmic, The PBR Guide by Allegorithmic - vol. 1, 2018, dostupno: <http://www.allegorithmic.com/pbr-guide>, (posjećeno 23. srpanj 2019).
19. Zakon očuvanja energije, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=66767>, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, (posjećeno 01. studenog 2018).
20. Allegorithmic, The PBR Guide by Allegorithmic - vol. 2, 2018, dostupno: <http://www.allegorithmic.com/pbr-guide>, (posjećeno 23. srpnja 2019).
21. Bailey, M. and Cunningham, S., Graphics Shaders, 2nd edn., New York, CRC Press Taylor & Francis Group, 2012., str. 179. - 185.
22. Wilson, J., Physically-based rendering, and you can too!, Marmoset LLC, [web-stranica], <https://marmoset.co/posts/physically-based-rendering-and-you-can-too/>, (posjećeno 03. srpnja 2019).
23. Polycount, Albedo / Base Color terms, [web-stranica], <https://polycount.com/discussion/158624/albedo-base-color-terms>, (posjećeno 03. srpnja 2019).
24. Stackexchange, 16bit half-float linear HDR images as (diffuse/albedo) textures?, [web-stranica], (posjećeno 03. srpnja 2019).
25. Wikipedia, Color depth, [web-stranica], https://en.wikipedia.org/wiki/Color_depth, (posjećeno 04. srpnja 2019).
26. Learn OpenGL, Normal Mapping, [web-stranica], <https://learnopengl.com/Advanced-Lighting/Normal-Mapping>, (posjećeno 03. srpnja 2019).
27. Community Foundry, DirectX Normal od OpenGL Normal?, [web-stranica], <https://community.foundry.com/discuss/topic/129960/directx-normal-or-opengl-normal>, (posjećeno 03. srpanj 2019).
28. Wikipedia, Heightmap, [web-stranica], <https://en.wikipedia.org/wiki/Heightmap>, (posjećeno 04. srpnja 2019).

29. Wikipedia, Displacement (vector), [web-stranica]., [https://en.wikipedia.org/wiki/Displacement_\(vector\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Displacement_(vector)), (posjećeno 03. srpnja 2019).
30. Blender 2.79 Manual, Displacement, [web-stranica]., <https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/cycles/materials/displacement.html>, (posjećeno 03. srpnja 2019).
31. Reddit, How does displacement mapping work in game engines?, [web-stranica]., https://www.reddit.com/r/computergraphics/comments/3wps68/how_does_displacement_mapping_work_in_game_engines/, (posjećeno 03. srpnja 2019).
32. Frozenbyte, 3D Asset Workflow: Baking and Texturing, [web-stranica]., https://wiki.frozenbyte.com/index.php/3D_Asset_Workflow:_Baking_and_Texturing, (posjećeno 03. srpnja 2019).
33. Baran, G., Environment PBR Texture Creation Using Photogrammetry, Gumroad, 2016.
34. Putting the CGI in IKEA: How V-Ray Helps Visualize Perfect Homes, Chaos-GroupTV, 22. ožujak 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=bJFlsIL1wFI>.
35. Spiral Graphics, What is Seamless Texture (3D Texture, Tileable Texture), [web-stranica]., <http://blog.spiralgraphics.biz/2010/srpanj/what-is-seamless-texture-3d-texture.html?m=1>, (posjećeno 04. srpnja 2019).
36. Wikipedia, Procedural texture, [web-stranica]., https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural_texture, (posjećeno 04. srpnja 2019).
37. Wikipedia, Ken Perlin, [web-stranica]., https://en.wikipedia.org/wiki/Ken_Perlin, (posjećeno 04. srpnja 2019).
38. Web Archive, Making noise, [web-stranica]., <https://web.archive.org/web/20srpanj1008162042/http://www.noisemachine.com/talk1/index.html>, (posjećeno 04. srpnja 2019).
39. Shea McCombs, Intro to Procedural Textures, [web-stranica]., <http://www.upvector.com/?section=Tutorials&subsection=Intro%20to%20Procedural%20Textures>, (posjećeno 04. srpnja 2019).
40. Rowe, B. and Cowley, D., Smart Texturing with Substance Designer and the Unreal Engine, [web-stranica]., <https://www.unrealengine.com/en-US/blog/substance-integration>, (posjećeno 05. srpnja 2019).
41. Texture Mapping, Department of Computer Science and Engineering, The Ohio State University, <http://web.cse.ohio-state.edu/~wang.3602/courses/cse5542-2013-spring/15-texture.pdf>, 2013, (posjećeno 22. studeni 2018).
42. UV mapping, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/UV_mapping, (posjećeno 22. studenog 2018).
43. McDermott, W., Creating 3D Game Art for the iPhone with Unity, Focal Press, 2011, str. 41.

44. Iezzi, L. Texel Density, <https://www.leonano.com/>, 2016, (posjećeno 22. studenog 2018).
45. Texel Density: What It Means & How To Use It, Warren Marshall, 20. kolovoza 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=Za5AIQXwqCs>.
46. Open Camera, Open Camera, <http://opencamera.org.uk/>, (posjećeno 03. kolovoza 2019).
47. Substance, Substance Alchemist, <https://docs.substance3d.com/sadoc/substance-alchemist-172823493.html>, (posjećeno 03. kolovoza 2019).
48. Substance Alchemist: Creating a material from a single image, Substance, 19. ožujak 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=rsQAHfaadaU>
49. Salvi, A., Your Smartphone is a Material Scanner: Vol.II, 07. travanj 2018, <https://www.substance3d.com/blog/your-smartphone-material-scanner-vol-ii>, (posjećeno 03. kolovoza 2019).
50. Substance, Substance Designer, <https://docs.substance3d.com/sddoc/substance-designer-user-guide-102400008.html>, (posjećeno 03. kolovoza 2019).
51. Agisoft, Agisoft Metashape Use Manual Professional Edition, Version 1.5, 2019, dostupno: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf, (posjećeno 03. kolovoza 2019).
52. AliceVision, <https://alicevision.org/>, [web-stranica], (posjećeno 03. kolovoza 2019).
53. Wikipedia, Point Cloud, [web-stranica], https://en.wikipedia.org/wiki/Point_cloud, (posjećeno 04. kolovoza 2019).
54. Substance Academy, Creating your first Substance material, <https://academy.substance3d.com/courses/Creating-your-first-Substance-material/youtube-y8q6-tgQjZc>, [web-stranica], (posjećeno 14. lipnja 2019).
55. Blender 2.80 Manual, Eevee, [web-stranica], <https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/eevee/index.html>, (posjećeno 01. rujna 2019).

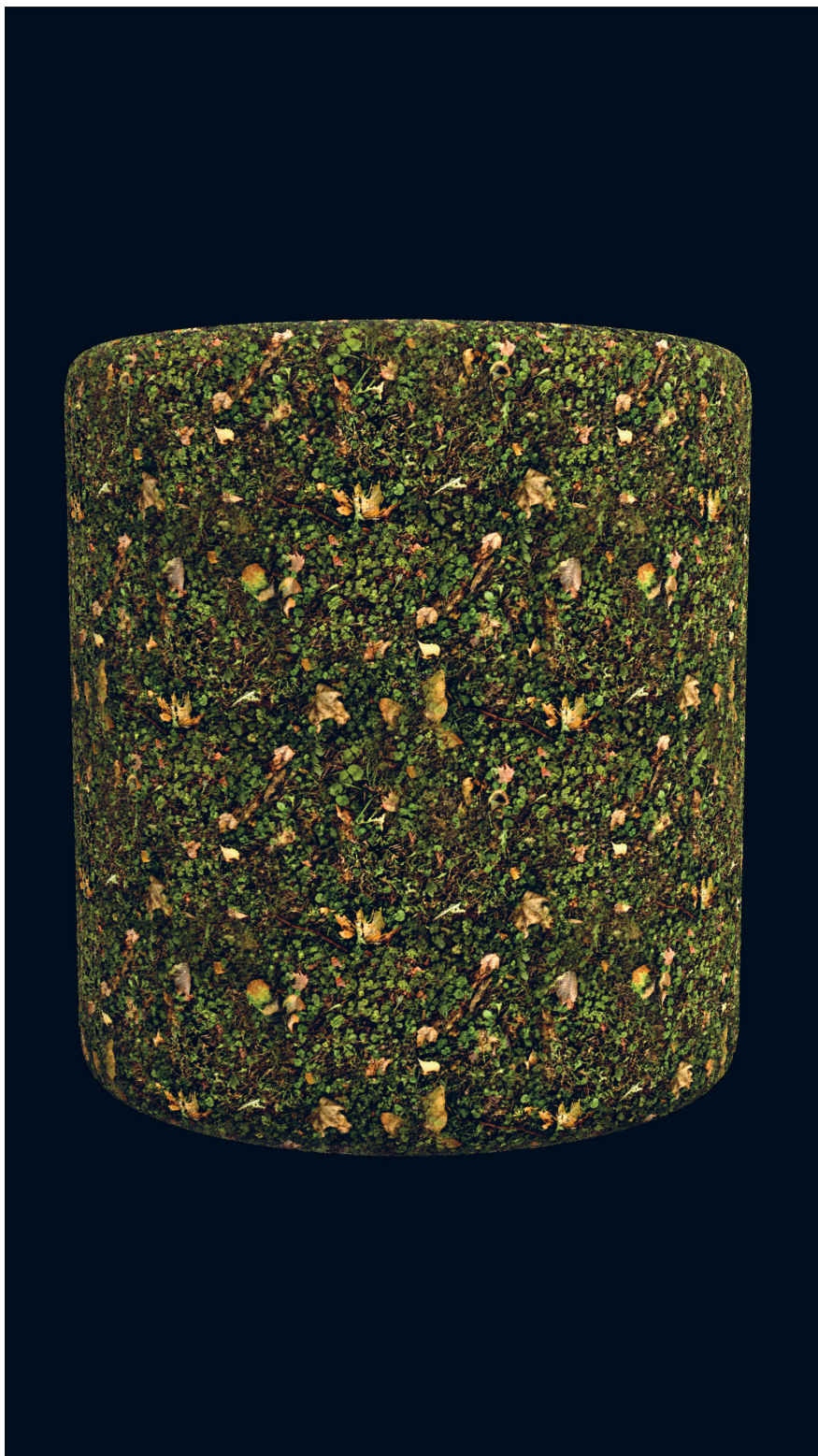
7. PRILOZI



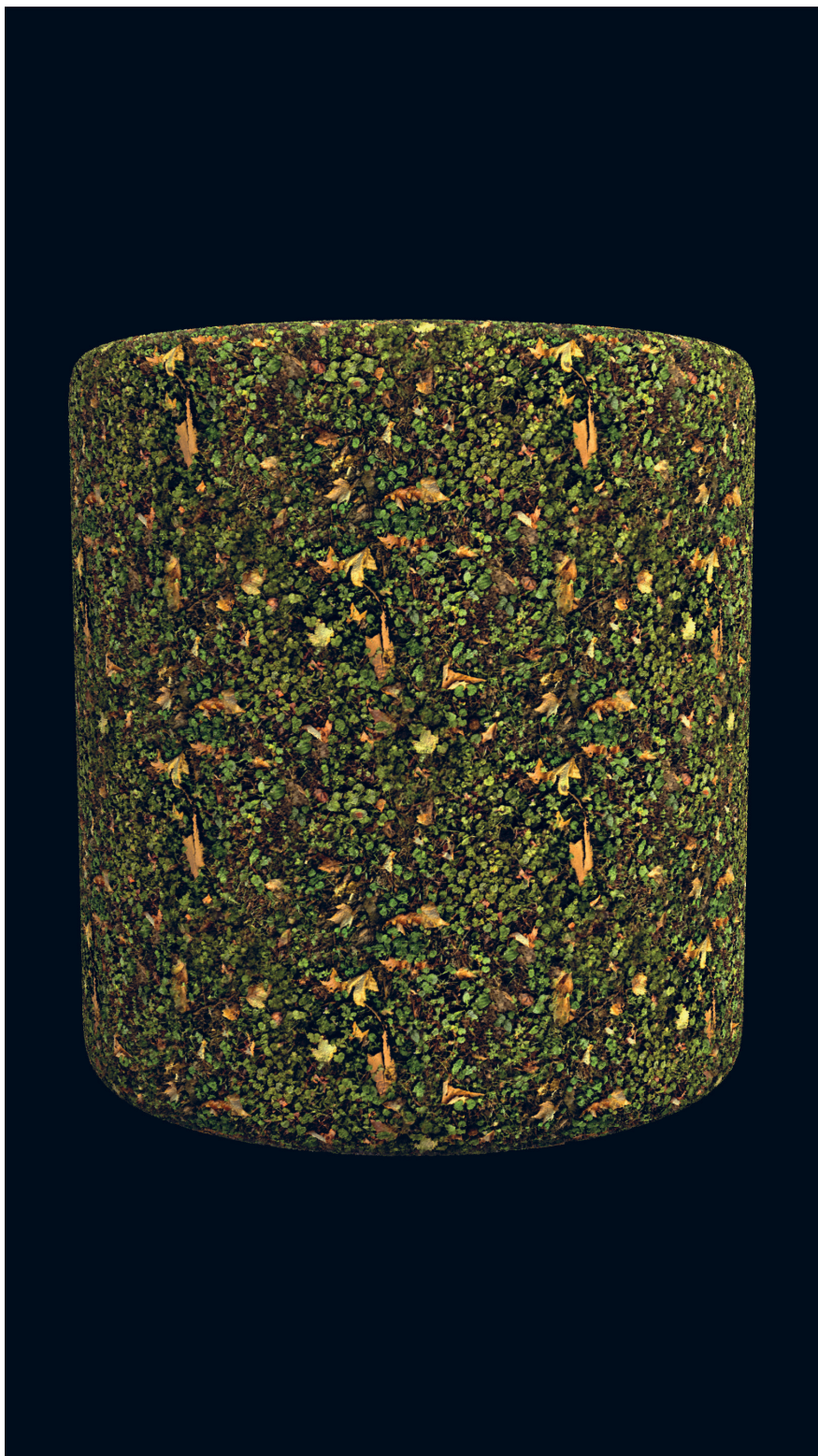
*Prilog 1. Render materijala parketa,
autorov rad*



*Prilog 2. Render materijala travnate površine V01,
autorov rad*



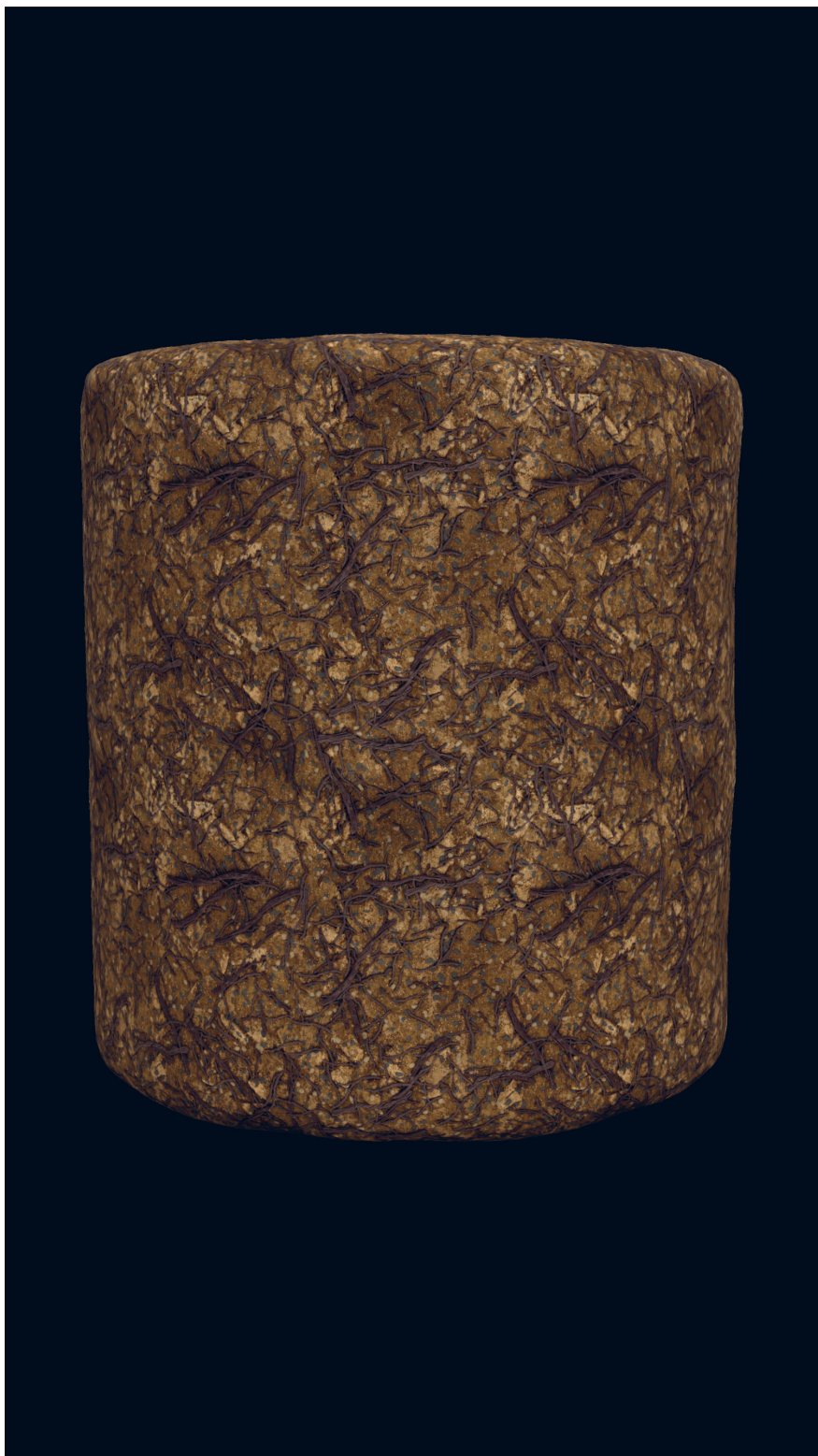
*Prilog 3. Render materijala travnate površine V02,
autorov rad*



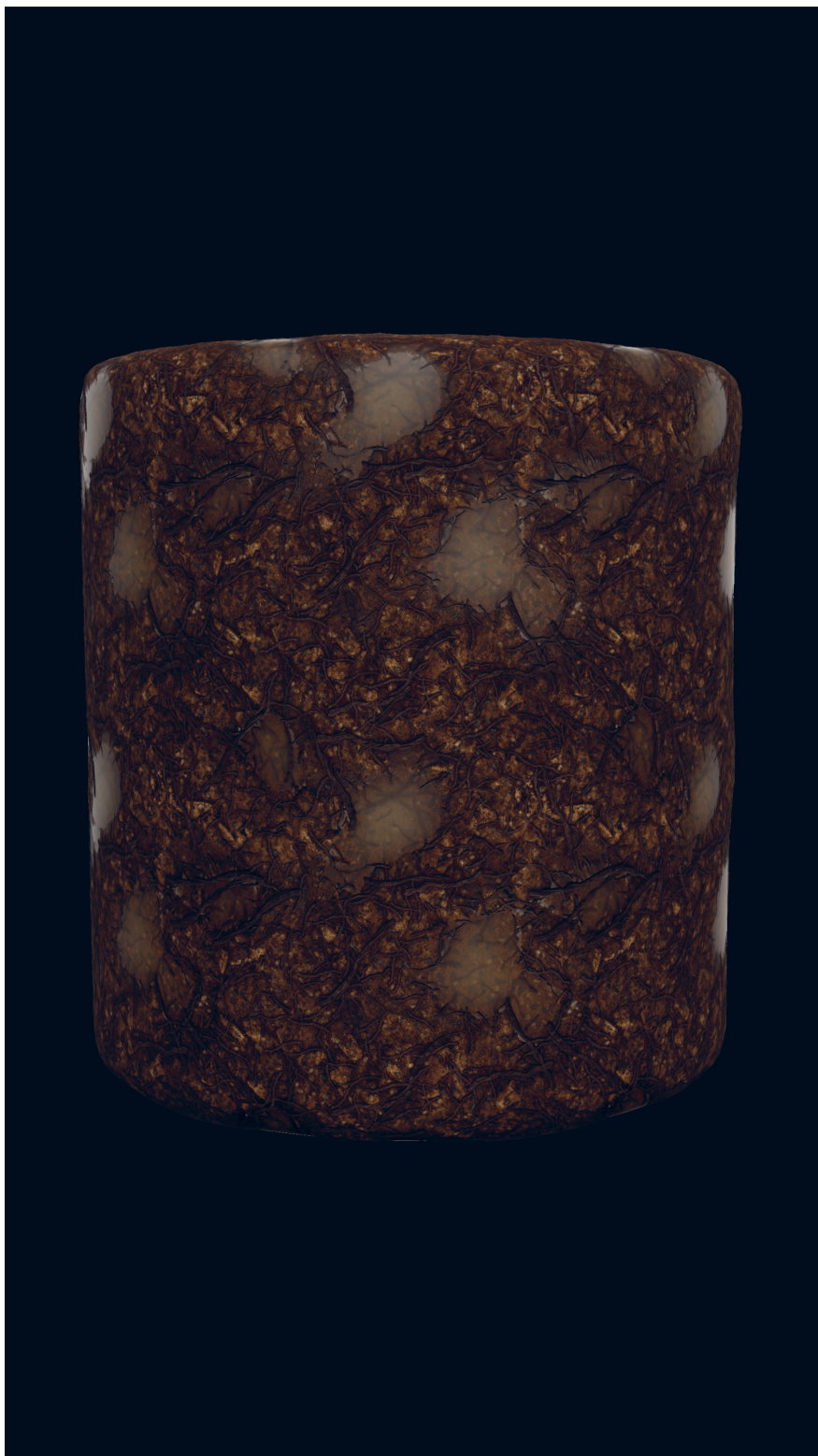
*Prilog 4. Render materijala travnate površine V03,
autorov rad*



*Prilog 5. Render materijala kamenčića,
autorov rad*



*Prilog 6. Render materijala tla,
autorov rad*



*Prilog 7. Render materijala tla s vodom,
autorov rad*



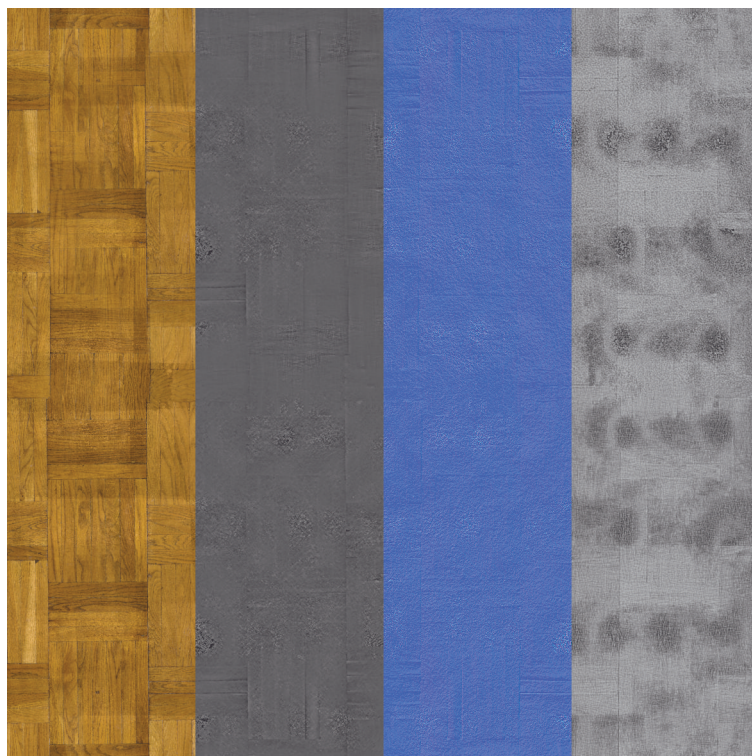
*Prilog 8. Render materijala lažne kože,
autorov rad*



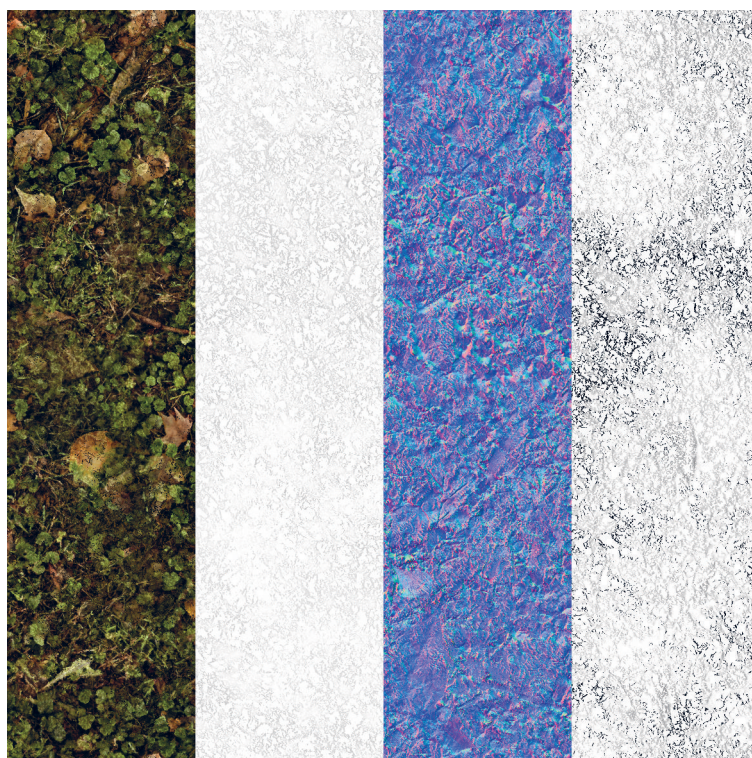
*Prilog 9. Render materijala kamena sa školjkama,
autorov rad*



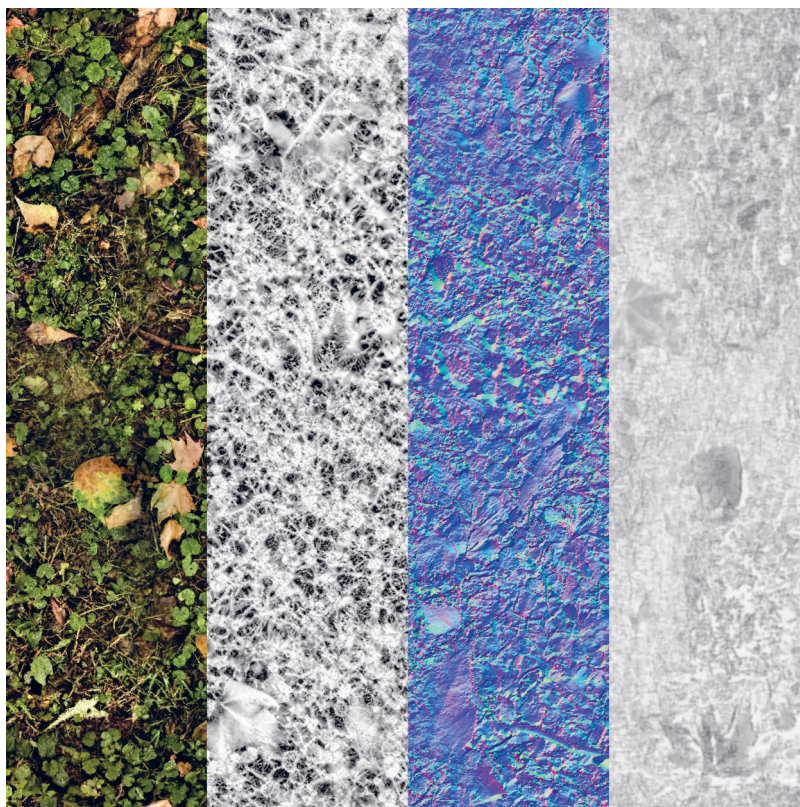
*Prilog 10. Render materijala kamena,
autorov rad*



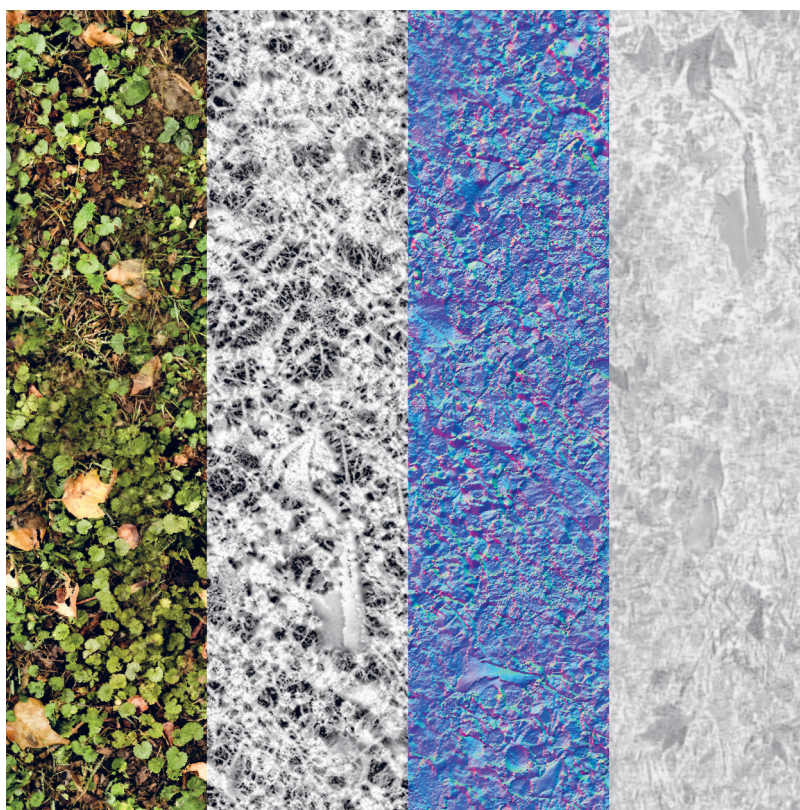
*Prilog 11. Teksture materijala parketa,
autorov rad*



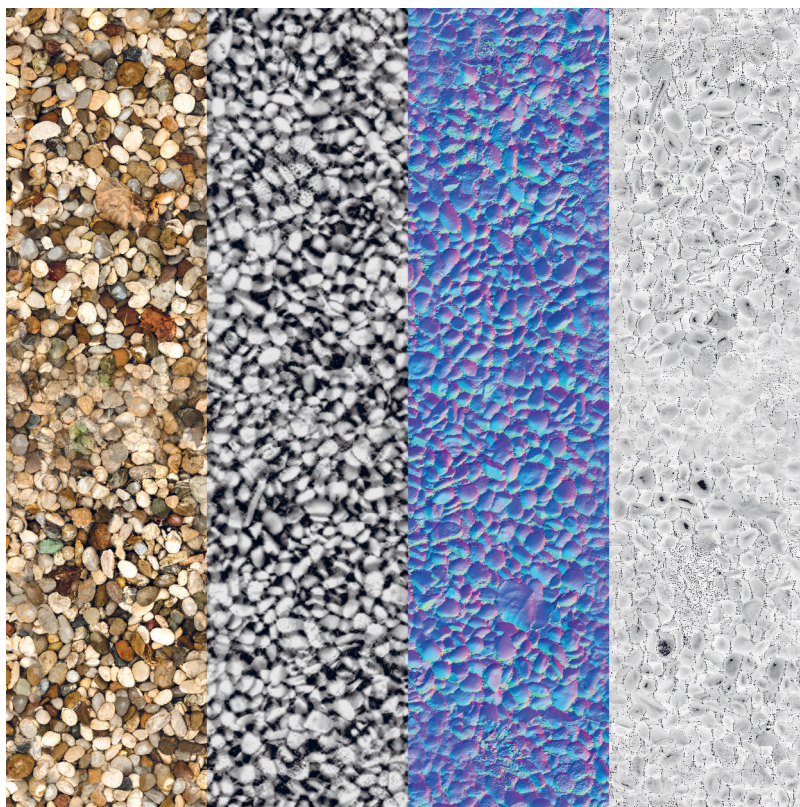
*Prilog 12. Teksture materijala travnate površine V01,
autorov rad*



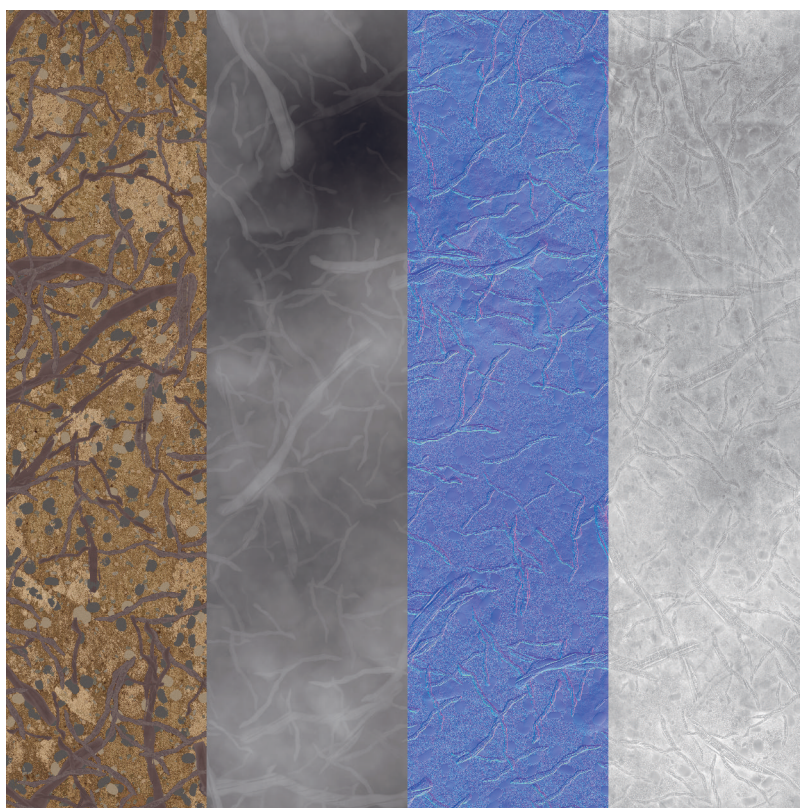
*Prilog 13. Teksture materijala travnate površine V02,
autorov rad*



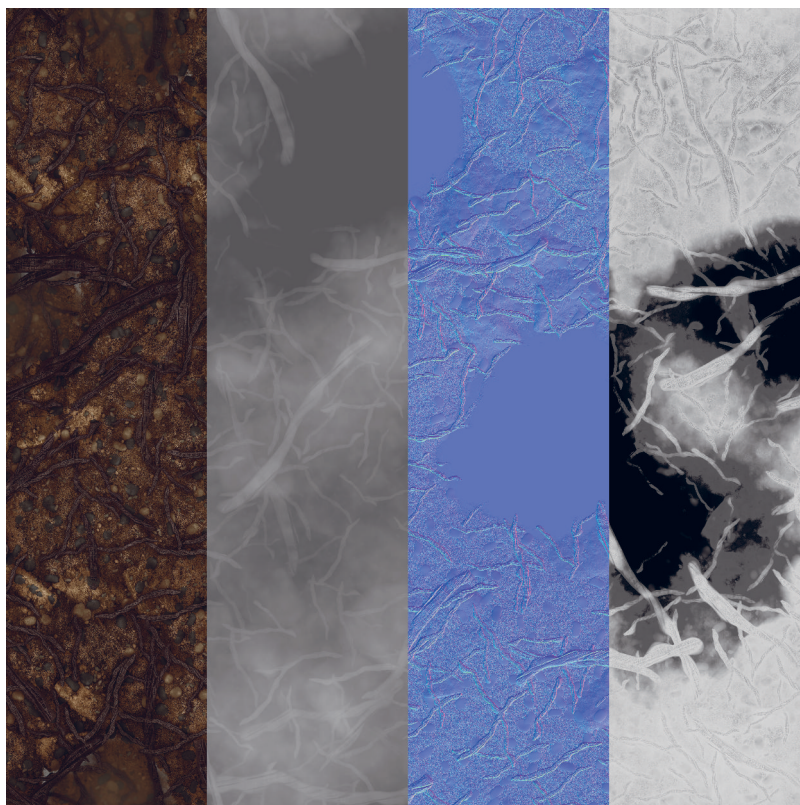
*Prilog 14. Teksture materijala travnate površine V03,
autorov rad*



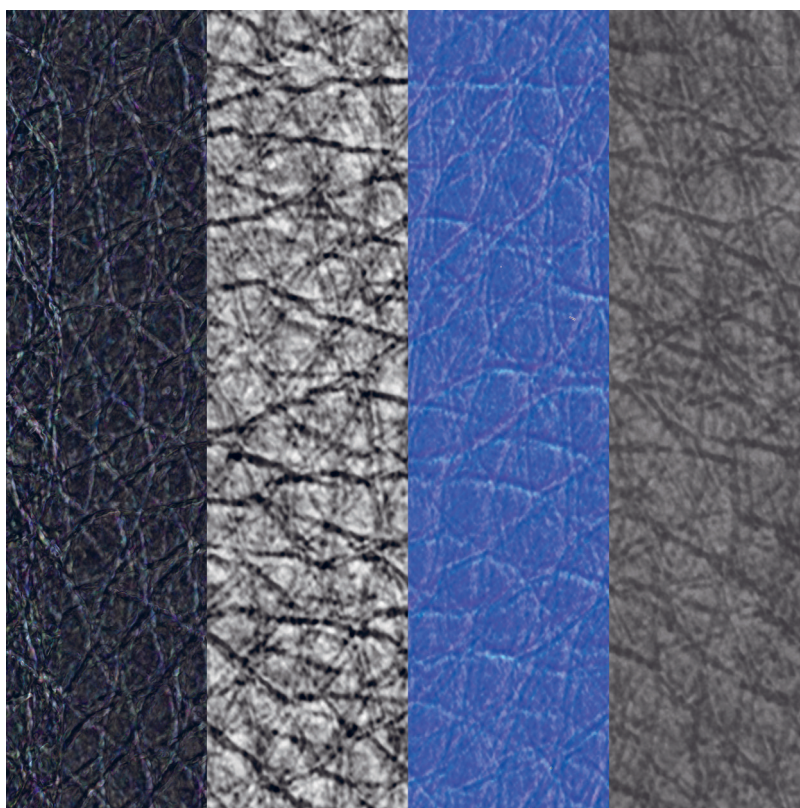
*Prilog 15. Teksture materijala kamenčića,
autorov rad*



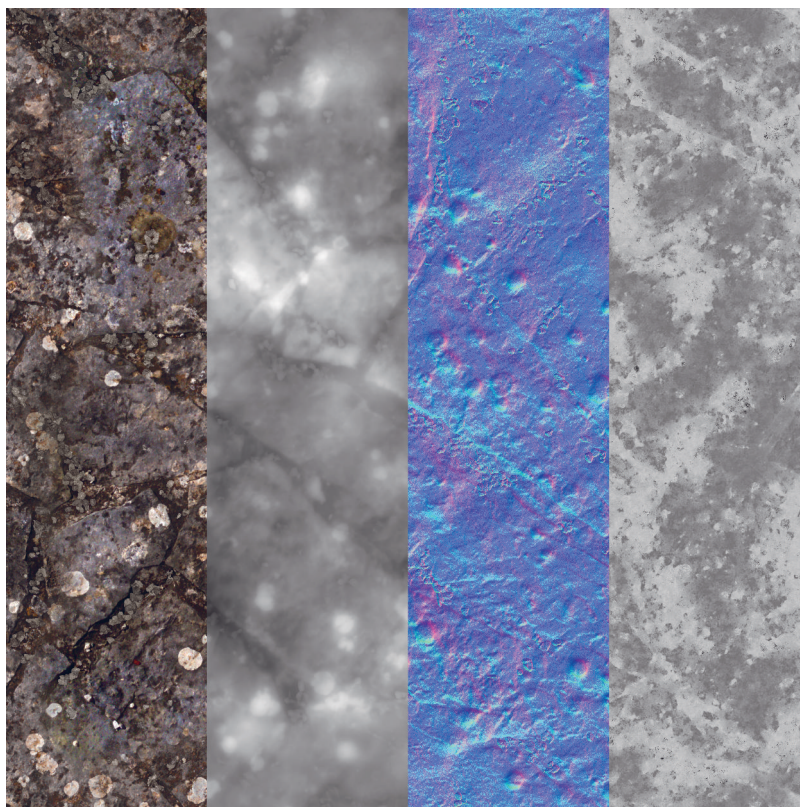
*Prilog 16. Teksture materijala tla,
autorov rad*



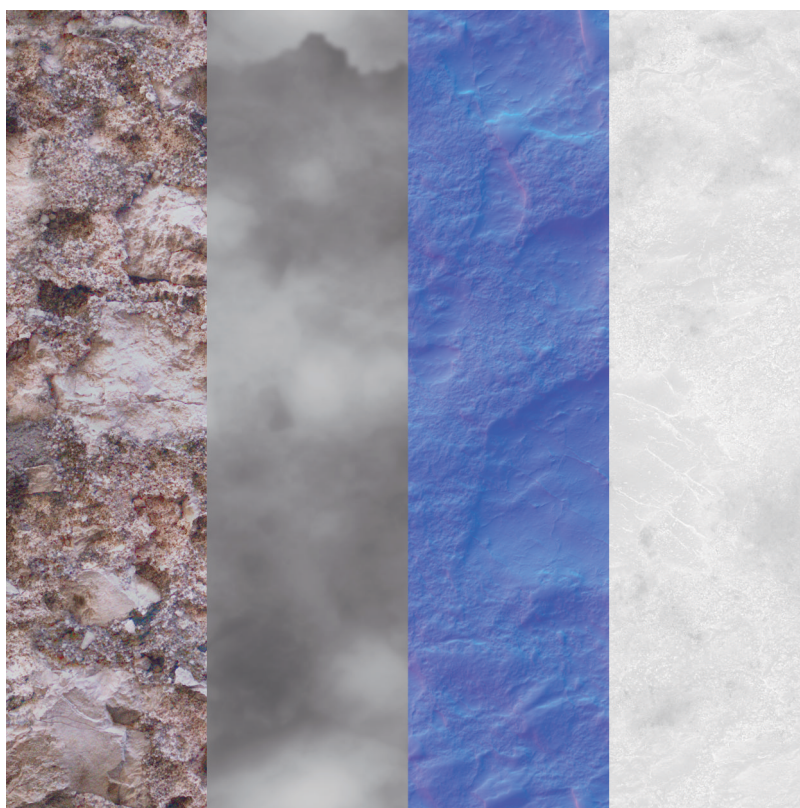
*Prilog 17. Teksture materijala tla s vodom,
autorov rad*



*Prilog 18. Teksture materijala lažne kože,
autorov rad*



*Prilog 19. Teksture materijala kamena sa školjkama,
autorov rad*



*Prilog 20. Teksture materijala kamena,
autorov rad*